УДК 621.771.29:620.179.083.133

Ю.С.Пройдак, С.И.Губенко, Л.В. Чуприна, Г.Д.Сухомлин, И.Г.Узлов, В.Н. Беспалько

БЕЙНИТНЫЕ СТАЛИ ДЛЯ ЦЕЛЬНОКАТАНЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ КОЛЕС

Досліджені сталі з бейнітною структурою після гарячої деформації та відпуску. Показана можливість отримання залізничних коліс з бейнітною структурою та твердістю 400НВ без термозміцнюючої обробки.

Исследованы стали с бейнитной структурой после горячей деформации и отпуска. Показаны возможности получения железнодорожных колес с бейнитной структурой и твердостью 400НВ без термоупрочняющей обработки.

Steels with bainite structure after hot deformation and tempering were investigated. It was shown the possibility of the railway wheels production with bainite structure and hardness of 400HB without heat strengthening treatment.

Проблема получения высокопрочных и надежных железнодорожных колес является актуальной во всем мире. Ее решение позволит существенно повысить конкурентную способность отечественных колес. Следует отметить сложность и многогранность этой проблемы, которая включает ряд аспектов, связанных с получением высококачественной стали, оптимизацией процессов обработки давлением на всех этапах получения колеса, разработкой новых конструкций колес, обеспечением необходимого уровня термического упрочнения. Современные условия эксплуатации железнодорожных колес тредуют существенных мероприятий по обеспечению повышенного уровня твердости ободьев до 400НВ. Такие проблемы могут быть решены в результате фундаментальных материаловедческих подходов.

Оптимальной структурой ободьев принято считать дисперсный перлит с небольшой долей феррита, что обеспечивает достаточно высокий комплекс показателей прочности, твердости и вязкости колесной стали [1]. Однако такая структура стали даже при использовании микролегирования позволяет получить максимальную твердость 330НВ и это дает основание считать, что возможности перлитной структуры в этом смысле исчерпаны и необходим новый нетрадиционный подход. Перспективной структурой стали, которая обеспечивает соотношение повышенных характеристик твердости, прочности и вязкости, является бейнит.

Известно, что в развитых железнодорожных странах проводятся разработки бейнитных рельсов и колес [2, 3]. Что касается бейнитных рельсов, то известный уровень их твердости (до 400 НВ) требует получения железнодорожных колес с соответствующей твердостью, что обеспечит соотношение твердости колесо/рельс (0,8-1,0)/1,0 [4], а также необходимый

© ПРОЙДАК Ю.С., ГУБЕНКО С.И., ЧУПРИНА Л.В., СУХОМЛИН Г.Д., УЗЛОВ И.Г., БЕСПАЛЬКО В.Н., 2006

 ISSN 1991-7848

уровень износостойкости и контактной прочности такой пары трения. Большинство исследований по разработке бейнитных колес были связаны с проблемой получения сталей с повышенным сопротивлением к мартенситному превращению с целью уменьшения и даже устранения вероятности образования многих поверхностных усталостных дефектов. Например, разработанная в работе [5] сталь, имеет повышенное сопротивление к мартенситному превращению, но ее механические свойства близки к свойствам стандартной колесной стали ERS. Из этой стали Кампания Вальдюн (Франция) производит железнодорожные колеса.

Целью настоящей работы было получение опытных сталей с твердостью 400НВ, а также повышенными механическими характеристиками по сравнению с колесной сталью, и сопротивлением к мартенситному превращению. Была также поставлена задача достижения возможности получения всех этих свойств без термического упрочнения.

Материалы и методики исследований

Были получены опытные стали разного химического состава: C – 0,12-0,45%; Si – 0,24-0,83%; Mn – 0,95-1,5%; Mo – 0,05-1,2%; Cr – 0,37-3,5%; Ni – 0,01-1,95%; V – 0,01-1,1%; Ti – 0,03-0,04%; Al – 0,03-0,05% (мас.). Было выплавлено шесть опытных плавок с разным содержанием углерода и легирующих элеменов: пл. 1 – с добавкой никеля, пл. 2, 6 – экономнолегированные, пл. 3, 4, 5 – безникелевые. Стали выплавляли в индукционной опытно-промышленной печи. Отливки подвергали пластической деформации ковкой по режиму: температура начала и конца деформации соответственно 1200 и 950-900^{0}C, степени деформации 50 и 90% (это степени деформации соответственно обода и диска при производстве колеса), охлаждение на воздухе (скорость охлаждения 1,5-5^{0}C/с в зависимости от времени года). После горячей деформации часть образцов отпускали при температуре 500-525^{0}C для снятия напряжений.

Металлографические исследования проводили с помощью оптической и электронной микроскопии (микроскопы «Неофот-21» и ЭМ-125). Рентгеноструктурные исследования проводили на рентгеновском дифрактометре ДРОН-2,0. Анализ интерференций α-фазы (110) и (220) проводили в медном монохроматическом излучении. Определяли размер блоков D_{HKL}, микронапряжения $\Delta a/a$, плотность дислокаций и количество остаточного аустенита.

Оценивали также склонность опытных сталей к образованию мартенсита при быстром нагреве и охлаждении в сравнении со стандартной колесной сталью торцевой закалкой по методу Джомини.

Для выполнения программы механических испытаний (прочностных и пластических свойств, вязких характеристик, износостойкости) из деформированных заготовок опытных сталей изготавливали образцы. Были изготовлены контробразцы с твердостью 400НВ и образцы из опытных сталей для проведения испытаний на износостойкость, механические и

ударные свойства. Базовыми значениями для сравнения были свойства по ГОСТ 10791-89 для колесной стали, ТУ У 27.1-4-571-2004, принятые для высокопрочных колес, а также свойства колесной стали по Европейскому стандарту (табл. 1).

Таблица 1

Механические характеристики по требованиям для колес из стандартной стали, повышенной прочности и Евростандарта pr EN 13262 (после термического упрочнения)

Требования ТУ У 27.1-4-571-2004 «Колеса цельнокатаные диаметром 957 мм повышенной прочности и износостойкости»	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5, %	ψ, %	НВ	KCU, Дж/см^2
	Не менее					
	1100	-	8,0	14,0	320	16
ГОСТ 10791-89	930-1130	-	8	14	255	2,0
Евр. Стандарт pr EN 13262	900-1050	-	12	-	245	12

Проводили испытания на статическое растяжение (испытательная машина “Instron” по ГОСТ 1497-89); ударный изгиб (на маятниковом копре PSW-5 по ГОСТ 9454-78); твердость (твердомер ТБ 5004 по ГОСТ 9012-59); относительные характеристики износостойкости материалов в парах трения “колесо-рельс” (машина испытательная СМЦ-2).

Результаты исследований и их обсуждение

Микроструктура стали пл. 1 после горячей деформации представляет собой бейнит с небольшим количеством мартенсита (около 5 %). Степень дисперсности структуры возрастает с увеличением степени деформации (рис. 1, а, б), кроме того, при степени деформации 90 % есть признаки полосчатости. Игольчатый бейнит является двойникованным. Такого типа бейнит еще называют реечным ферритом. Детальный анализ реплик показал, что в участках бейнита присутствуют ультрадисперсные карбиды (по-видимому, это Mo_2C и $(Fe, Cr)_3C$), в мартенситных прослойках карбиды не обнаружены.

Микроструктура стали пл. 2 после горячей деформации является феррито-перлитной, причем с увеличением степени деформации структура становится более дисперсной. При степени деформации 90 % проявляется ферритная полосчатость, что допустимо в структуре диска.

Микроструктура стали пл. 3 после горячей деформации представляет собой бейнито-ферритную смесь с небольшим количеством мартенсита; с увеличением степени деформации структура более дисперсна. Доля тонких прослоек мартенсита в бейните невелика (около 5 %), бейнит представляет собой реечный тип. В стали после горячей деформации сохранились зоны ликвации, что вызвало появление феррита в структуре.

 ISSN 1991-7848

Микроструктура горячедеформированной стали пл. 4 представляет собой бейнит с небольшим количеством мартенсита. Увеличение степени деформации способствует диспергированию структуры стали. Доля мартенсита в структуре невелика – порядка 5 %. Бейнит в изучаемой структуре – реечный, ближе по морфологии к верхнему бейниту. В бейнитных рейках видны дисперсные карбиды $(Fe, Cr)_3C$, хотя встречаются участки бейнита и без карбидов. Гладкие участки на репликах соответствуют мартенситу (рис. 1, в, г), который является мелкоигольчатым и его наличие в бейните (в небольших количествах) обусловлено природой бейнитного превращения. Очевидно, что при образовании и росте бейнитных реек (пластин, игл) локальное перераспределение углерода и легирующих элементов изменяет кинетику и механизм распада аустенита.

Микроструктура горячедеформированной стали пл. 5 представляет собой бейнит, степень дисперсности которого увеличивается при степени деформации от 50 до 90 %. При степени деформации 50 % рейки бейнита близки к структуре верхнего бейнита. В структуре бейнита присутствуют дисперсные карбиды VC, Mo_2C.

Микроструктура стали пл. 6 после горячей деформации представляет собой ультра дисперсный перлит с очень тонкими прослойками феррита на границах перлитных зерен (рис. 1, д). Степень дисперсности перлита выше после деформации на 90 %, при этом проявилась ликвационная полосчатость (ликвация компонентов стали унаследована от литого состояния). Объемная доля перлита достигает 98 %, феррита – около 2 %. На репликах видна морфология перлита с тонкими ферритными прослойками. Тонкий перлитный цементит экстрагировался на реплику (рис. 1, е), где можно увидеть степень его дисперсности и зачатки сфероидизации в процессе охлаждения после горячей деформации.

Электронномикроскопические исследования бейнита в опытных сталях показали, что и верхний, и нижний бейнит имеют благоприятную реечную структуру, для которой характерна ячеистая дислокационная субструктура с повышенной плотностью дислокаций 10^{11}-10^{12} $см^{-2}$, близкая к субструктуре деформированного металла (см. рис. 1,б, г). Это дает возможность допустить, что бейнит в определенной степени наследует субструктуру деформации. На степень дисперсности как бейнитной структуры, так и ячеистой субструктуры, благоприятно влияет степень горячей деформации. Анализ тонкой структуры мартенситных участков показал, что в мартенсите прошел самоотпуск при температуре бейнитного превращения, поэтому он не будет вызывать хрупкость стали.

Система легирования сталей влияет на положение критических точек, смещая их по температурной шкале, и таким образом влияет на морфологию α-фазы и карбидов в бейнитной структуре. В бейните верхнем (безкарбидном) значительная часть углерода, который не успел продиффундировать в окружающий аустенит во время роста реек бейнита,

поступает к дислокациям и образует на них атмосферы Коттрелла (это может быть до 0,05 % С). Остаток углерода расходуется на образование карбидов и мартенсита. Верхний бейнит не требует отпуска, поэтому он является благоприятной структурой с точки зрения соотношения характеристик прочности, пластичности и вязкости стали. Это очень важно, поскольку в литературе часто более благоприятной структурой считают нижний бейнит и критикуют верхний бейнит.

Рентгеноструктурные исследования позволили получить параметры тонкой структуры бейнита в опытных сталях после горячей деформации (табл. 2).

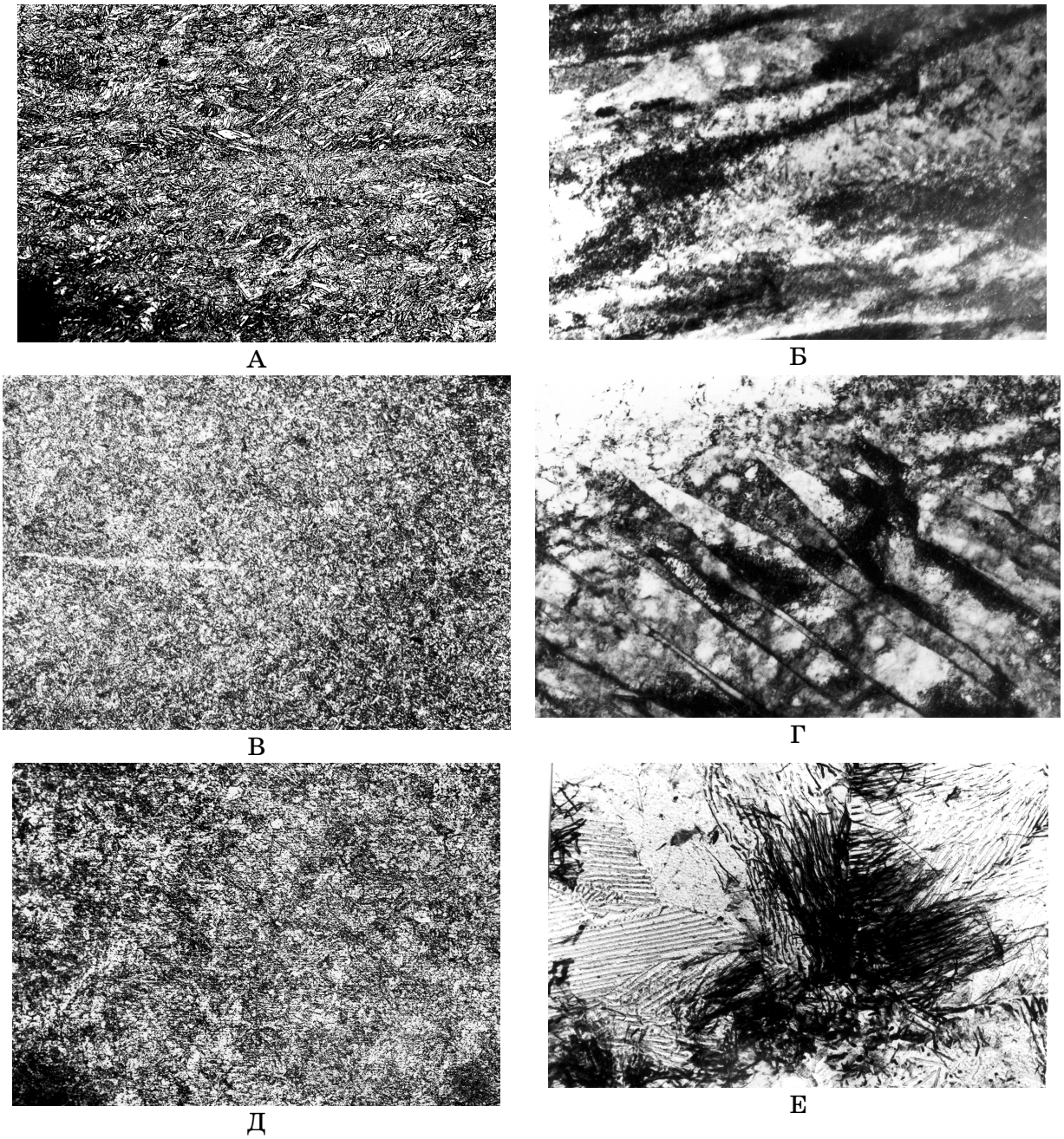


Рисунок 1 - Структура горячедеформированных сталей пл.1 (а,б), пл.4 (в,г) и пл.6 (д,е): а,в,д - х 200, б,г – х22000, е – х12000

 ISSN 1991-7848

Таблица 2

Параметры тонкой структуры бейнита сталей опытных плавок 1, 3, 4 после горячей деформации (D_{HKL} – размер блоков, Δ a/a – микронапряжения, $\rho_{\perp}$ – плотность дислокаций)

Режим обработки	пл. 1			пл. 3			пл. 4		
	$D_{HKL}\cdot 10^{-4}$ см	Δ a/a $\cdot 10^{-3}$	$\rho_{\perp}$, $см^{-2}$	$D_{HKL}\cdot 10^{-4}$ см	Δ a/a $\cdot 10^{-3}$	$\rho_{\perp}$, $см^{-2}$	$D_{HKL}\cdot 10^{-4}$ см	Δ a/a 10^{-3}	$\rho_{\perp}$, $см^{-2}$
Горячая деформация (ε = 50 %)	4,4	2,32	$7\cdot 10^{12}$	3,9	-	$4,5\cdot 10^{11}$	3,0	0,45	$2,6\cdot 10^{12}$
Горячая деформация (ε = 50 %) + отпуск	4,5	2,24	$6,5\cdot 10^{11}$	4,8	-	$6,9\cdot 10^{10}$	2,7	0,21	$5,0\cdot 10^{11}$

Уровень микронапряжений у сталей всех плавок после отпуска уменьшается. Значения плотности дислокаций подтверждают результаты электронномикроскопических исследований; после отпуска этот параметр уменьшается на порядок, что благоприятно для свойств сталей. Что касается количества остаточного аустенита, то после горячей деформации он находится на уровне: пл. 1 – 5 – 5,3 %, пл. 3 – 7 – 7,6 %, пл. 4 – 10 – 10,7 %.

Таким образом, по результатам изучения микроструктуры горячедеформированных сталей можно сделать следующие выводы. Горячая деформация практически не изменила тип структуры сталей всех плавок по сравнению с исходным литым состоянием, однако существенно увеличила степень дисперсности структурных составляющих, причем в тем большей степени, чем больше была степень деформации. Это свидетельствует о стабильности процессов структурообразования в изучаемых сталях при охлаждении в момент распада аустенита, а также о возможности диспергирования их структуры путем интенсификации деформации. Из изучаемых сталей, только стали плавок 2 и 6 не дали в горячедеформированном состоянии бейнитную структуру, что связано с недостаточным количеством в них легирующих элементов. В сталях после степени деформации 90 % проявляется ферритная (пл. 2), либо ликвационная полосчатость.

Что касается сталей плавок 1, 3-5, то после горячей деформации их основной структурой является бейнит с очень небольшим количеством мартенсита, что связано с природой бейнитного превращения и локальным перераспределением углерода и легирующих элементов при зарождении и росте бейнитных реек. Структуры, содержащей 100 % бейнита, не бывает. Кроме бейнита и мартенсита, присутствуют дисперсные карбиды молибдена, ванадия, легированного хромом цементита, а в стали пл. 3 – еще и избыточный феррит. Характер бейнита в сталях разных наплавок отличается как по морфологии, так и по степени дисперсности. Тем не

менее, очень важно, что бейнитная структура в изучаемых горячедеформированных сталях была получена без специальной термической обработки, поэтому необходимо оценить уровень механических свойств этих сталей.

Непосредственно после деформации измеряли твердость опытных сталей (табл. 3). Ее величина зависит от состава и структуры стали. Сталь пл. 2 с феррито-перлитной структурой имеет низкую твердость. Сталь пл. 6 с перлитной структурой имеет более высокую твердость, чем сталь пл. 2, однако ее значения после степени деформации 50 % значительно ниже 400 НВ. Что касается сталей пл. 1 и 3-5, то после горячей деформации их твердость достигает 400 НВ и даже выше, и это объясняется наличием бейнитной структуры со специальными дисперсными карбидами. Это дает основание предположить, что требуемый уровень твердости ободьев колес может быть получен после горячей деформации колеса без последующей термоупрочняющей обработки (закалки). Практически у всех сталей с увеличением степени деформации твердость увеличивается, что связано с диспергированием структуры и, по-видимому, с увеличением плотности дислокаций.

Для уменьшения внутренних напряжений после термического упрочнения железнодорожные колеса обычно подвергают отпуску, поэтому горячедеформированные образцы также подвергали отпуску (500-525^{0}С, 1 ч). Затем измеряли их твердость (табл. 3). После этого, для каждой плавки (кроме стали пл. 2, которая сразу после металлографических исследований была исключена, как неперспективная) проводили механические испытания образцов на статическое растяжение и ударный изгиб (предварительная степень деформации 50 %, а для стали пл. 4 с целью сравнения результатов – и после деформации на 90 %). Результаты испытаний приведены в табл. 2, которые следует сравнивать с механическими характеристиками колесной стали по ГОСТ 10791-89 и Евростандарту, а также новой стали с ванадием для высокопрочных колес (см. табл. 1). Очевидно, что после горячей деформации получены механические свойства опытных сталей, которые по уровню прочности, пластичности, твердости и вязкости превышают не только требования стандартов Украины, Европейского, UIC, но и недавно принятых ТУ У 27.1-4-751-2004 для цельнокатаных колес повышенной прочности.

Это в первую очередь касается сталей пл. 1 и 4, у которых все свойства находятся на очень высоком уровне. Сталь пл. 3 имеет значение ударной вязкости чуть ниже, чем у ванадиевой стали для высокопрочных колес, но все же выше, чем у стандартных колесных сталей, что связано с наличием феррита в ее структуре. По-видимому, появление феррита можно избежать при стабильном процессе деформации и охлаждения. Провалы пластичности у стали пл. 5 обусловлены ее химической и структурной неоднородностью, унаследованной от литого состояния (это издержки выплавки в опытных условиях). Сталь пл. 6 после горячей деформации

 ISSN 1991-7848

имеет существенно более низкие механические характеристики, чем стали пл. 1, 3-5, что связано с перлитной структурой, хотя эти свойства лучше, чем у стандартных колесных сталей после термического упрочнения (см. табл. 1).

Таблица 3.

Твердость и механические свойства сталей опытных плавок после горячей деформации и отпуска

№ пл.	Состояние стали	Свойства					
		Тв., НВ	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_т$, МПа	S_5, %	Ψ, %	KCU, Дж/см^2
1	г/д, ε = 50 %	405	-	-	-	-	-
	г/д, ε = 90 %	420	-	-	-	-	-
	г/д, ε = 50 %, отп.	432	1591	1318	13,2	25,3	28,92
	г/д, ε = 90 %, отп.	455	-	-	-	-	-
2	г/д, ε = 50 %	190	-	-	-	-	-
	г/д, ε = 90 %	264	-	-	-	-	-
	г/д, ε = 50 %, отп.	195	-	-	-	-	-
	г/д, ε = 90 %, отп.	250	-	-	-	-	-
3	г/д, ε = 50 %	408	-	-	-	-	-
	г/д, ε = 90 %	410	-	-	-	-	-
	г/д, ε = 50 %, отп.	402	1309	1082	8,3	19,8	15,61
	г/д, ε = 90 %, отп.	409	-	-	-	-	-
4	г/д, ε = 50 %	420	-	-	-	-	-
	г/д, ε = 90 %	424	-	-	-	-	-
	г/д, ε = 50 %, отп.	437	1457	1044	9,5	14,0	25,91
	г/д, ε = 90 %, отп.	451	1542	1124	11,9	28,5	41,8
5	г/д, ε = 50 %	400	-	-	-	-	-
	г/д, ε = 90 %	401	-	-	-	-	-
	г/д, ε = 50 %, отп.	409	1610	1164	7,8	8,2	25,79
	г/д, ε = 90 %, отп.	432	-	-	-	-	-
6	г/д, ε = 50 %	338	-	-	-	-	-
	г/д, ε = 90 %	475	-	-	-	-	-
	г/д, ε = 50 %, отп.	363	1036	666	13,0	42,9	12,18
	г/д, ε = 90 %, отп.	434	-	-	-	-	-

Сравнение механических характеристик для стали пл. 4 после степеней деформации 50 и 90 % показывает, что и для диска получены высокие свойства (табл. 3).

Проведены испытания образцов из бейнитных сталей пл. 1, 3, 4 на износ после горячей деформации на степень 50% и отпуска. Результаты испытаний образцов опытных сталей представлены в таблице 4. Для сопоставления в таблице 5 приведены результаты испытаний на износ образцов, вырезанных из серийного колеса.

Горячедеформированные стали пл.1 и 4 показали высокие значения износостойкости (табл. 4), которые были выше у стали пл.1 (суммарная потеря массы 0,859 г). Тем не менее и сталь пл.4 имеет износ при суммарной потере массы 1,134 г ниже, чем у образцов серийной колесной

стали. Очень важно отметить высокую износостойкость контртела, что очень важно как показатель воздействия бейнитного колеса на рельс (контртело, как аналог рельса, истирается в минимальной степени). С учетом высокого комплекса механических свойств, это позволяет рекомендовать получение бейнитных колес без термоупрочняющей обработки. Представляет интерес наглядно продемонстрировать повышение износостойкости бейнитных сталей по сравнению с обычной колесной сталью, сопоставив потери массы последней на разных расстояниях от поверхности катания (табл. 5) с потерями массы образцов с бейнитной структурой. Результаты определения относительной потери массы образцов бейнитных по сравнению с серийной колесной сталью представлены в таблице 6. Таким образом, степень износа образцов бейнитных сталей составляет 54,4 – 81,2 % по сравнению с износом серийной колесной стали. В процессе испытаний на износ образцов бейнитных сталей определены характеристики: момент трения, сила трения и коэффициент трения (см. табл. 4.).

Таблица 4

Результаты испытаний образцов из бейнитных сталей на износ

Характеристикиа образца	Потеря массы образца, г	Потеря массы контртела, г	Суммарная потеря массы, г	Момент трения, кГсЧсм	Сила трения, кГс	Коэффициент трения
Пл. 1 г/деф.+отп.	0,73	0,129	0,859	67,3	33,65	0,48
Пл.4. г/деф.+отп.	0,983	0,151	1,134	72,0	36,0	0,51

Таблица 5

Результаты испытаний на износ образцов, вырезанных из серийного колеса после термического упрочнения

Расстояние от поверхности катания, мм	Потеря массы образца, г
15	1,21
30	1,31
45	1,34

Таблица 6

Относительная потеря массы образцов бейнитных сталей по сравнению с серийной колесной сталью после термоупрочнения, %

Опытный образец	Образец колесной стали на расстоянии от поверхности катания, мм		
	15	30	45
пл.1 г/деф.+ отп.	60,0	55,7	54,4
Пл.4 г/деф. + отп.	81,2	75,0	73,4

 ISSN 1991-7848

Кроме механических характеристик – прочностных, пластических, вязких, которые связаны с накоплением тепловой и механической усталости, износом поверхности катания и гребня, пластическими сдвигами в тонком поверхностном слое, а также возникновением дефектов (ползунов, трещин, раковин), необходимо исследовать склонность опытных сталей к мартенситному превращению в условиях резкого нагрева и охлаждения. Многие поверхностные дефекты появляются в условиях резкого торможения, когда тонкий слой поверхности катания в результате трения от резкого действия тормозной колодки разогревается до температуры аустенитной области (выше 800^0C). Тогда происходит деформация тонкого слоя металла в аустенитном (пластичном) состоянии [6], что не может выдержать большую эксплуатационную нагрузку, а потом поверхность катания резко охлаждается при отключении тормозов, и это приводит к формированию при ускоренном охлаждении, так называемого, «белого слоя». Известно, что №белый слой» представляет собой ультрадисперсный мартенсит (гарденит), который имеет повышенную хрупкость, особенно при ударах колеса о стыки рельсов (т.е. при динамической нагрузке). Кроме того, он способствует формированию в зонах теплового воздействия вышеперечисленных дефектов и это приводит к повышению количества металла, снимаемого при переточке в процессе восстановления профиля поверхности катания.

Для сравнения, торцевой закалке по методу Джомини при нагреве в аустенитную область подвергали образцы стандартной колесной стали, а также опытных сталей плавок 1, 3, 4, 5, 6. Результаты измерения микротвердости на концах образцов, а также вдоль их длины, представлены в таблице 6.

Таблица 7

Микротвердость (HV) по длине образцов

Сталь, плавка	Место измерения от края образца, мм						
	0	2	4	6	8	10	12
Колесная сталь	640	640	625	500	320	250	250
1	400	400	400	400	390	380	380
3	420	445	430	420	420	370	380
4	450	460	470	440	460	430	430
5	460	470	450	440	450	435	430
6	600	600	590	590	580	575	570

Стандартная колесная сталь и опытная сталь пл. 6 показали склонность к мартенситному превращению. Стали плавок 1, 3, 4, 5 показали стабильные значения микротвердости, уровень которой отвечает наличию бейнитной структуры, что подтверждено также металлографическими исследованиями этих образцов. Безусловно, полностью исключить возможность образования ползунов и связанных с ними динамических нагрузок в колесах из бейнитной стали невозможно,

однако очевидны ее преимущества в этом плане в сравнении с колесами из стандартной стали.

Выводы. Анализ горячедеформированных сталей, подвергнутых деформации по режимам, имитирующим режимы получения обода и диска при производстве колес, показал, что стали плавок 1, 3 – 5 имеют бейнитную структуру уже без упрочняющей термической обработки. Исключение составили стали пл. 2 и 6, определенные в наших опытных плавках как экономнолегированные. Содержание легирующих элементов в этих сталях оказалось недостаточным для получения бейнита в результате самозакалки. Остальные стали проявили себя как самозакаливающиеся и это очень перспективно. Кроме того, проведенные измерения твердости этих сталей, показали, что ее значения находятся в интервале 400-480 НВ и соответствуют уровню твердости бейнита, а механические свойства значительно превышают свойства применяемых колесных сталей. Интересно отметить, что склонность к самозакаливанию проявилась и у никельсодержащей стали (пл. 1) и у безникелевых сталей (пл. 3 – 5). При проведении данных исследований возникла новая перспективная задача получения бейнитной структуры железнодорожных колес без использования термоупрочнения, а возможно - с прокатного нагрева. Это может позволить получить высокопрочные бейнитные колеса, исключив стадию термического упрочнения из цикла производства, хотя, безусловно, проведение отпуска для снятия внутренних напряжений необходимо. Исследования показали, что бейнитные стали весьма перспективны для производства железнодорожных колес.

ЛИТЕРАТУРА

1. Колесная сталь./Узлов И.Г., Есаулов А.Т. и др.-К.:Техніка. 1985.- 168с., илл.-Библиограф.: с.161-167.
2. Медовар Л.Б., Цыкуленко К.А., Цыкуленко А.К. Бейнитные стали для рельсов.// Проблемы СЭМ.-1998.-№3.- с.10-20.
3. Bhadeshia H.K.D.H. Bainite in Steels. London: Institute of Materials. 1992.- 468 p.
4. Узлов И.Г., Моисеева Л.А. Особенности производства цельнокатаных колес, бандажей и осей. Соответствие их уровня и качества условиям эксплуатации.// Залізничний транспорт України.- 1997. - № 2-3. – С.20-21.
5. Cassidy P.D. A new wheel material for the new century. // XIII International Wheelset Congress.-Rome.-Italy.-Sept. 17-21.-2001.
6. Таран Ю.Н., Есаулов В.П., Губенко С.И. Повышение износостойкости железнодорожных колес с разным профилем поверхности катания.// Металлургическая и горнорудная промышленность.- 2000. - № 2. - с. 42-44.

 ISSN 1991-7848

О.М. Шаповалова, М.О. Матвеева, В.Н. Беспалько

ВЛИЯНИЕ ХРОМА НА ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В ЧУГУНАХ

Методом дифференциально-термического анализа исследовали процессы происходящие при нагреве в легированном хромом чугуне. Получены зависимости влияния 0,2...5,3 % хрома на температуру начала газонасыщения и фазовые превращения в металле экспериментальных плавок. Установлено, что начиная с содержания 1,17% хром обеспечивает достаточно высокий комплекс эксплуатационных свойств.

Методом диференційно-термічного аналізу досліджували процеси, що відбуваються при нагріванні у легованому хромом чавуні. Отримані залежності впливу 0,2...5,3 % хрому на температуру початку газопоглинання та фазові перетворення у металлі експериментальних плавок. Встановлено, що починаючи з вмісту 1,17% хром забезпечує достатньо високий комплекс експлуатаційних властивостей.

The method of the differential thermal analysis investigates the processes occurring at heating in alloyed lame pig-iron. Dependences of influence of 0,2-5,3 % Cr on temperature gassing and phase transformations into metal of experimental swimming trunks are received. It is established, that since the contents of 1,17 % provides high enough complex operational properties.

Система железо-углерод является основой большинства сталей и многих сплавов – как наиболее распространенных в промышленности, так и обладающих уникальными физическими, механическими и химическими свойствами. Знание закономерностей формирования фазового состава и зеренного строения Fe-C-сплавов необходимо для установления характера влияния легирования, раскисления, модифицирования, термической, деформационной и других видов обработки на структуру и свойства сталей, чугунов и других сплавов на основе железа. Полиморфизм железа, склонность к возникновению метастабильных состояний с разными компонентами, широкое разнообразие фазовых переходов в сплавах Fe-C позволяет считать их универсальной модельной системой. Поэтому выяснение физической природы и механизма процессов формирования структур Fe-C сплавов имеет существенное значение для развития общей теории сплавов и для решения задач литейного производства, в частности производства отливок из чугунов.

Анализ состояния вопроса. Фазовая диаграмма или диаграмма равновесия, указывает фазовый состав сплава в определенные моменты охлаждения в условиях равновесия. По ней можно определить относительное количество фаз, возникающих в отдельных температурных интервалах, на отдельных этапах нагрева или охлаждения, процентное содержание компонентов в этих фазах. Но диаграмма состояния не дает представления о формировании структур, так как они связаны с кинетикой и механизмом кристаллизации, превращения в твердом состоянии и

© ШАПОВАЛОВА О.М., МАТВЕЕВА М.О., БЕСПАЛЬКО В.Н., 2006

зависят от процессов диффузии, зарождения центров кристаллизации, скорости их роста и других факторов. Так, например, в условиях относительно быстрого охлаждения (метастабильная система) в доэвтектических сплавах цементит образуется в виде эвтектического, вторичного и эвтектоидного. Однако в структуре реальных чугунов не всегда одновременно наблюдаются все разновидности цементита.

В практических условиях охлаждения, в результате отклонений от равновесных условий изменяются как состав фаз, так и концентрация углерода в них. В связи с этим, для выявления фактической картины процесса затвердевания и формирующихся при этом фазах и структурах необходимо пользоваться как диаграммой равновесного состояния, так и кинетическими и термокинетическими диаграммами. В работе [1] подчеркивается, что только изучение статики совместно с кинетикой позволяет правильно оценить явления, протекающие в чугуне в процессе его охлаждения. В литейном производстве особое место занимает применение хрома, одного из основных легирующих элементов в конструкционных чугунах. Хром широко используют также в качестве регулятора отбеливаемости и стабилизатора карбидной фазы; он увеличивает твердость и износостойкость инструментальных отливок [2,3], придает чугуну специфические свойства, высокую окалиностойкость, жаростойкость и теплоустойчивость [4].

Целью настоящих исследований является изучение влияния экономного легирования хромом на фазовые переходы в белых и половинчатых литейных чугунах, а также на эксплуатационные свойства отливок сформированные в результате этих фазовых переходов.

Известные данные [1] по сопоставлению кинетических диаграмм кристаллизации хромистых чугунов вблизи эвтектического состава (рис.1) показывают, что увеличение содержания хрома не оказывает заметного влияния на относительное положение линии появления аустенита БЗ, следовательно, хром незначительно влияет на степень эвтектичности чугуна. Температурный интервал выделения графита уменьшается и при концентрациях >1,92% Cr - графит из расплава не выделяется. Сдвиг линии ОФ вправо свидетельствует о том, что с ростом содержания хрома выделение графита затрудняется.

Постановка задачи исследования. В исследованиях, проведенных авторами настоящей работы для чугунов содержащих 3,13...3,15% углерода получено, что графитизация прекращалась уже при содержании хрома 1,17 % [5]. Практически отсутствуют данные о процессах происходящих в области низких температур, которые определяют начало газопоглощения, что существенно для анализа жаро- и коррозионной стойкости.

 ISSN 1991-7848

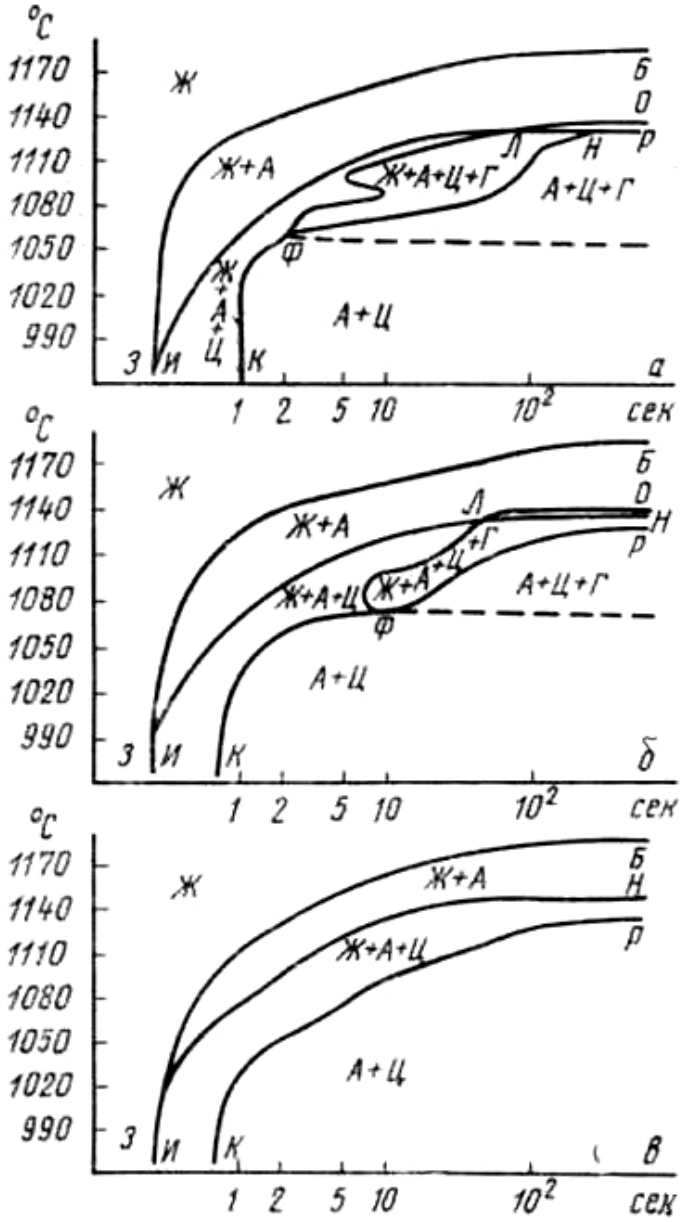


Рисунок 1 - Влияние содержания хрома на кинетику кристаллизации чугуна:

а - 4,24% углерода, 0,48% хрома;

б – 4,23% углерода, 0,94% хрома;

в - 4,20% углерода, 1,92% хрома [1]

Методы исследования. Опытные плавки проведены на высокочастотной установке ВЧИ10-10/0,44. Масса единовременной загрузки 0,2±0,01 кг. Химический состав базового чугуна (%, по массе): C 3,14; Si 2,2; Mn 0,61; Cr 0,2; S 0,03; P 0,05. Время плавки в разогретом тигле 100±10 с. Температуру металла в печи определяли термопарой Pt/Pt с записью на потенциометре КСП-4.

Известно, что любое изменение состояния металлов и сплавов (фазовое, внутрифазовое или структурное превращения) вызывает изменение энтальпии, а потому должно сопровождаться тепловым

эффектом – выделением или поглощением тепла. Для исследования химических реакций и превращений, происходящих под влиянием нагрева или охлаждения сплавов, применяется метод дифференциального термического анализа, позволяющий измерять незначительные тепловые эффекты, и метод термогравиметрии, с большой точностью, определяющий изменение массы исследуемого образца в процессе превращения.

Кривая термогравиметрического анализа (ТГ) позволяет следить за превращениями исследуемого металла и произвести расчеты с определенным количеством продуктов реакции. Трудности оценки кривой ТГ привели к созданию дифференциальной термографии. Кривая скорости изменения массы образца во времени (ДТГ) дает достаточно надежные данные о превращениях в исследуемом металле. Одновременное определение изменения массы и энтальпии позволяет полнее анализировать происходящие превращения. Совместные термический и термогравиметрический анализы осуществляются с помощью дериватографов.

Принципиальная схема дериватографа приведена на рис.2 [6]. Исследуемый образец и эталонный металл помещаются в тигли 2 и 3 печи 1. Массу исследуемого металла определяют на весах 7, на коромысло которых опирается тигель. Оптическая щель 6 на стрелке весов размещена так, что при смещении стрелки световой луч от осветителя 8 запишет на светочувствительной бумаге 12 барабана 13 изменение массы исследуемого образца. Скорость изменения массы измеряется с помощью катушки 10, подвешенной к коромыслу весов и находящейся в поле постоянного магнита 9. Магнитное поле индуцирует в движущейся катушке ток, сила которого пропорциональна скорости движения коромысла, а следовательно, и скорости изменения массы исследуемого образца. Световой гальванометр 11а записывает на светочувствительной бумаге кривую ДТГ. Тигли 2 и 3 выполнены таким образом, что спаи 4 термопар 5 размещены внутри образцов. Кривая дифференциально-термического анализа описывается показаниями дифференциальной термопары, измеряющей разность температур эталонного и исследуемых образцов; через гальванометр 11в луч осветителя 8 записывает показания термопары на светочувствительную бумагу 12. Температура печи записывается с помощью гальванометра 11б.

Экспериментальные исследования и обсуждение результатов. Исследовали образцы с содержанием хрома (%, по массе): 0,20; 0,48; 0,97; 5,30; скорость нагрева 100 град/мин, навеска ~ 0,55 г.

Для всех образцов с изменяющейся концентрацией хрома установлены низкотемпературные превращения в интервале 40-60^{0}С – это процессы удаления влаги и адсорбированных газов.

В чугуне с 0,2% хрома при температуре 280^{0}С начинается процесс газонасыщения, а при содержании 0,48% хрома температура начала газонасыщения 285^{0}С. Таким образом наблюдается последовательное повышение температуры начала газопоглощения (рис.3):

 ISSN 1991-7848

280^0C → 285^0C → 310^0C → 330^0C → 510^0C

0,2% Cr 0,48% Cr 0,97% Cr 1,17% Cr 5,3% Cr.

Из рис.3 следует, что хром значительно повышает температуру начала газопоглощения от 280 до 510^0C. Следовательно, жаростойкость чугунов существенно возрастает при увеличении концентрации хрома (примерно в 1,8 раза).

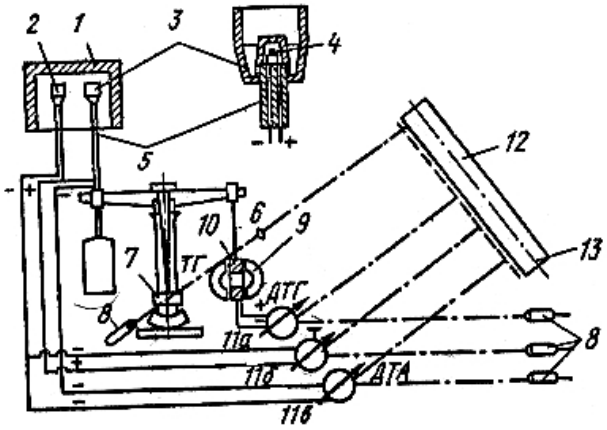


Рисунок 2 - Принципиальная схема дериватографа [6]

Можно предположить, что процессы газопоглощения обусловлены следующими факторами. Увеличением растворимости водорода с повышением температуры по закону Сивертса [7], изменение коэффициента диффузии с повышением температуры приведено в табл.1 и на рис.4.

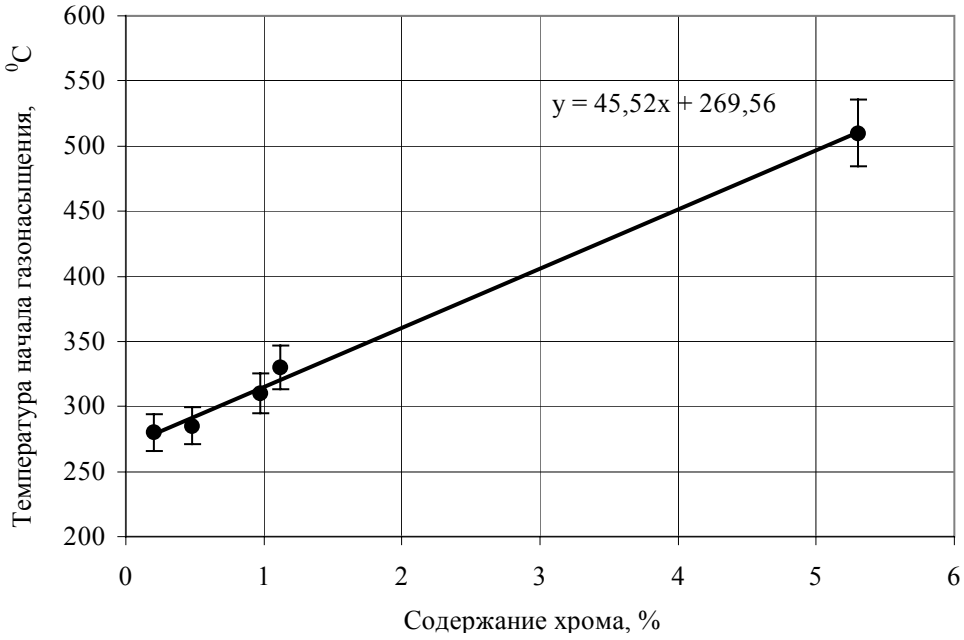


Рисунок 3 - Влияние содержания хрома на газонасыщение чугунов

Таблица 1

Изменение коэффициента диффузии водорода в зависимости от температуры

t^0, С	20	100	200	300	400	500	600	700	800
Д х 10^5 $см^3/с$	1,5	3,5	6,7	10,0	13,8	17,0	20,4	23,4	26,9

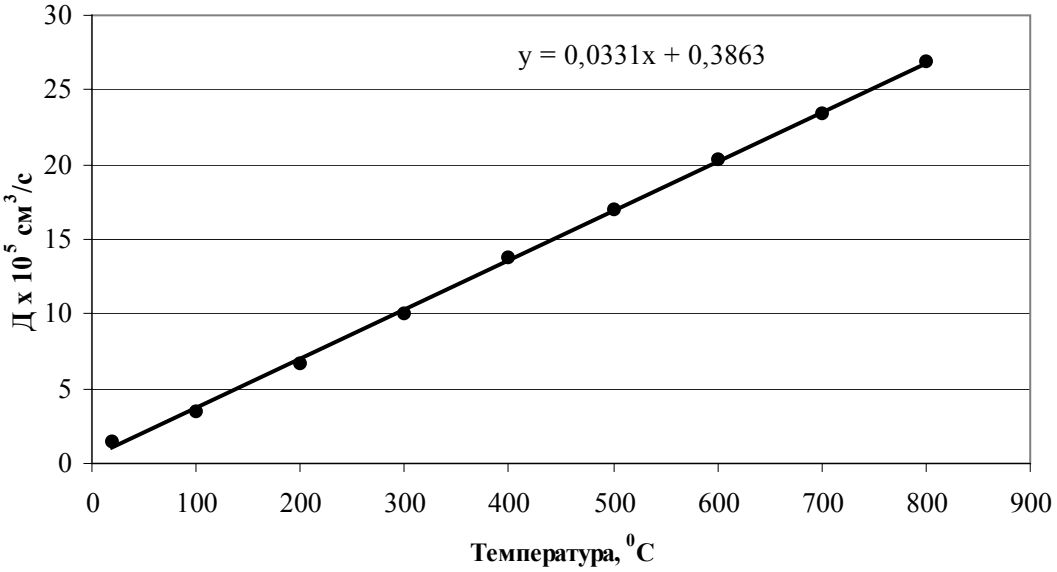


Рисунок 4 - Изменение коэффициентов диффузии водорода в α-Fe при повышении температур от 20 до 800^0С и нормальном давлении

Из анализа графика рис.4 следует: с повышением температуры коэффициент диффузии водорода в α-Fe повышается в ~18 раз в указанном интервале температур.

Хотя растворимость азота в твердом железе очень невелика, но в температурном интервале от 200 до 590^0С она возрастает с ~ 0,004% до 0,10% [8]. Растворимость кислорода в рассматриваемом температурном интервале практически отсутствует, но окисление включает несколько последовательно идущих этапов. Первым из них является адсорбция молекул кислорода из воздуха поверхностными атомами металла.

Установлено, что хром сдвигает образование окисной пленки в область более высоких температур. Температура с которой начинается резкий прирост массы возрастает с увеличением содержания в чугуне хрома следующим образом (рис.5):

750^0С → 770^0С → 780^0С → 850^0С → 880^0С

0,2% Cr 0,48% Cr 0,97% Cr 1,17% Cr 5,3% Cr.

 ISSN 1991-7848

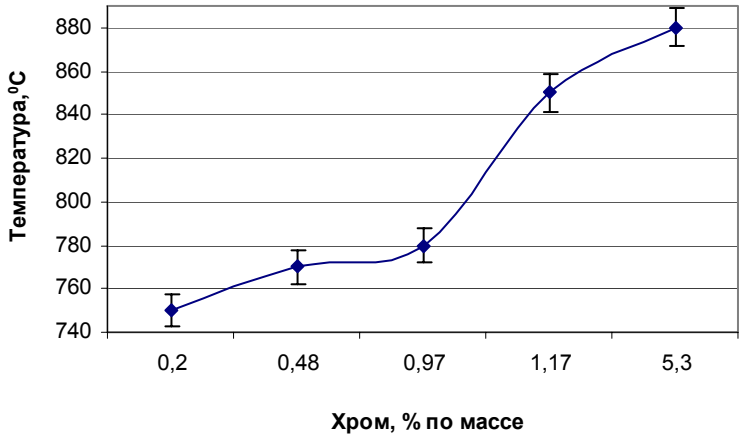


Рисунок 5 - Влияние хрома на процесс образования окисной пленки

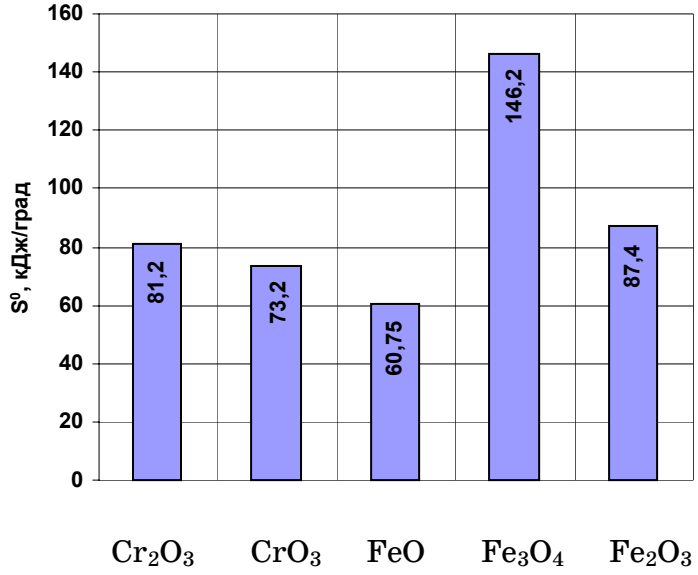
При небольшом количестве хром не участвует в образовании защитных окисных плен в чугуне. Структура окалины при содержании хрома в чугуне 0,2 - 1,17 %, так же как и в сером чугуне, является трехслойной и состоит из окислов железа. Это FeO (закись железа), которая образуется в случае окисления железа на воздухе при 700 и 800^0; пленка Fe_3O_4 - образуется при нагревании железа, окисленного с поверхности в результате взаимодействия металла и кислорода воздуха при комнатной температуре; окись железа Fe_2O_3 - является одним из наиболее стойких соединений железа с кислородом, эта пленка также образуется при оксилении на воздухе при температурах 600-900^0C. Однако во всех случаях под наружной тонкой пленкой Fe_2O_3 образовываются также пленки Fe_3O_4 и FeO. При охлаждении до комнатной температуры все три окисла остаются неизменными. Образование окиси железа из элементов происходит с выделением тепла 196,25 ккал/моль.

Оксиды металлов представляют собой промежуточные фазы с ионным типом связи. По сравнению со стехиометрическим составом, который отражает химическая формула, в решетке оксидов может быть избыток ионов металла или кислорода. Избыток создают либо ионы металла, расположенные в межузельных порах, либо вакансии в узлах решетки вследствии недостатка ионов металла или кислорода. Таким образом, кристаллическая решетка оксидов переменного состава дефектна: чем больше вакансий или межузельных ионов, тем больше дефектность и хуже защитные свойства оксидов. В таких рыхлых оксидах, к которым относятся и оксиды железа, перемещение ионов кислорода к поверхности металла облегчено, поэтому скорость окисления велика.

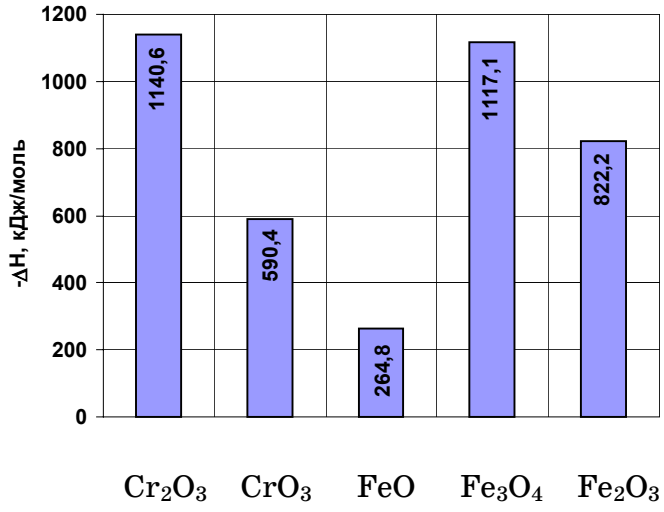
Исключением является оксид Cr_2O_3, который практически бездефектен, и поэтому обладает хорошими защитными свойствами. При содержании в сплаве 5,3% хрома это устойчивое соединение образуется в опытном чугуне, если исходить из термодинамических данных (рис.6) Cr_2O_3 имеет высокую энтальпию (- ΔH 1140,6 кДж/моль) и небольшое

значение энтропии (S^0 81,2 кДж/град). Оксид Cr_2O_3 является плотным, перемещение ионов (обычно это атомы металла) затруднено и в зависимости от температуры окисления обеспечивается различными физическими процессами. При невысоких температурах ионы перемещаются в результате миграции под влиянием электрического поля, возникшего из-за перемещения электронов от внутренней поверхности оксида к внешней. При повышеннных температурах перемещение ионов обеспечивает диффузия вследствие разницы в концентрации ионов металла на внутренней и внешней поверхности. Скорость окисления в этом случае несколько больше, чем при миграции, но также невелика по сравнению со скоростью оксиления рыхлых оксидов.

Анализ кривых ДТА металла опытных плавок в области высоких температур (рис.7) показывает следующее.



а)



б)

Рисунок 6 – Термодинамические характеристики оксидов хрома и железа

 ISSN 1991-7848

Образец с содержанием хрома 0,2% был взят для сравнения, шихта переплавлена без дополнительного легирования, его структура – серый чугун с пластинчатым графитом и феррито-перлитной матрицей. Участие в процессах хрома из-за его незначительного количества не обнаружено. Участок III (рис.7, а) на кривой ДТА для этого образца связан с процессами аустенитизации перлита. Аустенитизация в интервале температур эвтектоидного равновесия происходит по реакции П (Ф+Ц) → А и начинается, когда феррит пересыщается углеродом и термодинамически возможен переход $\alpha \rightarrow \gamma$. Кристаллы аустенита зарождаются преимущественно на межфазных поверхностях феррит-цементит. Процесс может идти неравномерно, на него оказывает влияние ликвация хрома в различных участках дендритных ветвей. Первые кристаллы аустенита (γ – твердого раствора) образуются по бездиффузионному (сдвиговому) механизму [9], а потом по диффузионному. По мере $\alpha \rightarrow \gamma$ трансформации происходит последовательное растворение цементита перлита. При дальнейшем нагреве (участок IV) развиваются процессы растворения эвтектоидного графита и полиморфное превращение $\alpha \rightarrow \gamma$, в котором участвует α твердый раствор матрицы чугуна, образованный при охлаждении по реакции А → Ф + Г. Для начала этих превращений требуется большая степень перегрева, увеличение разности свободных энергий фаз, поэтому они реализуются при более высоких температурах, чем процесс аустенитизации перлита. Выше эвтектоидного интервала (метастабильного и стабильного равновесия) перлит и феррит переходят в аустенит, который при дальнейшем нагреве обогащается углеродом (повышается растворимость углерода в аустените) в результате растворения.

При содержании хрома 0,48% получен половинчатый чугун (11% площади шлифа заняты графитом) [5]. Участок III на кривой ДТА (рис.7, б) для этого образца также связан с процессами аустенитизации перлита и происходит по той же реакции и механизму, что и в предыдущем образце. По мере $\alpha \rightarrow \gamma$ трансформации растворяется перлитный цементит, а при более высоких температурах и вторичный цементит. Выше эвтектоидного интервала перлит переходит в аустенит, который при дальнейшем нагреве обогащается углеродом в результате растворения вторичного графита (на кривой ДТА отмечается участок IV).

Кривые ДТА для образцов белого чугуна, содержащего 0,97% (рис.7, в), 1,17% (рис.7, г), 5,3% (рис.7, д) хрома, идентичны, но они отличаются от кривых для первых двух образцов тем, что на них отсутствует участок IV. Участок III на кривых ДТА в этих образцах также связан с процессами аустенитизации перлита. По мере $\alpha \rightarrow \gamma$ трансформации растворяется перлитный цементит, а выше эвтектоидного интервала, аустенит обогащается углеродом благодаря растворению вторичного цементита.

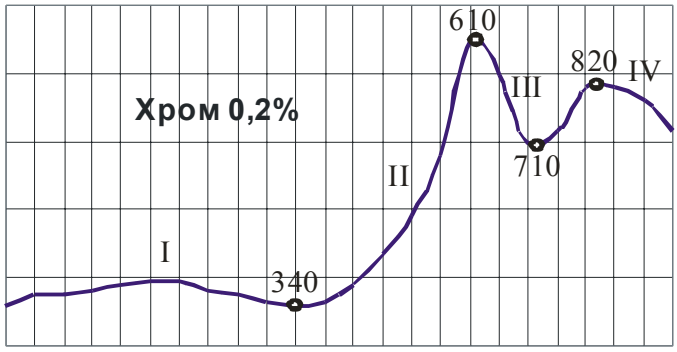
Могут также развиваться процессы выравнивания химического состава аустенита.

Приведенный анализ позволяет проследить изменение температуры начала образования аустенита (рис.8):

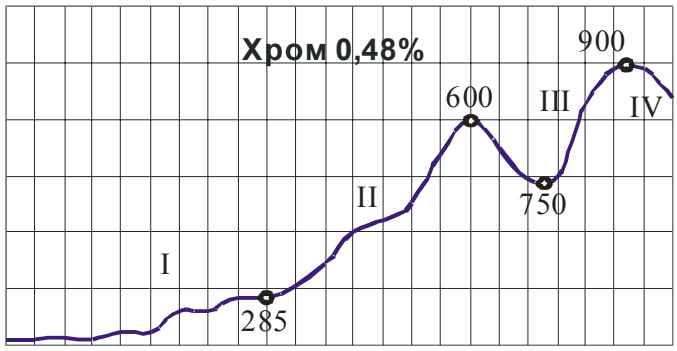
610^0C → 600^0C → 590^0C → 600^0C → 640^0C

0,2% Cr 0,48% Cr 0,97% Cr 1,17% Cr 5,3% Cr.

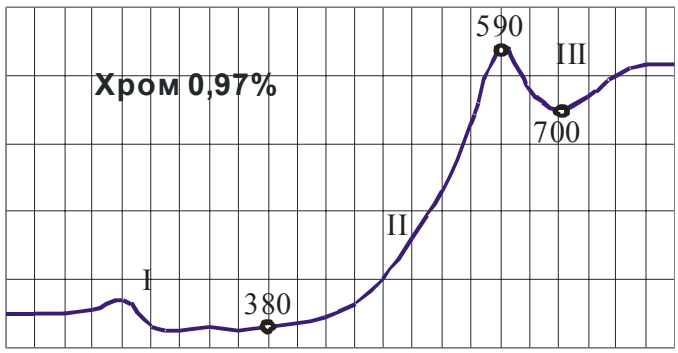
Из приведенных данных следует, что достаточно чугун легировать 1,17% хрома, чтобы обеспечить его высокую жаропрочность, наряду с жаростойкостью.



а)

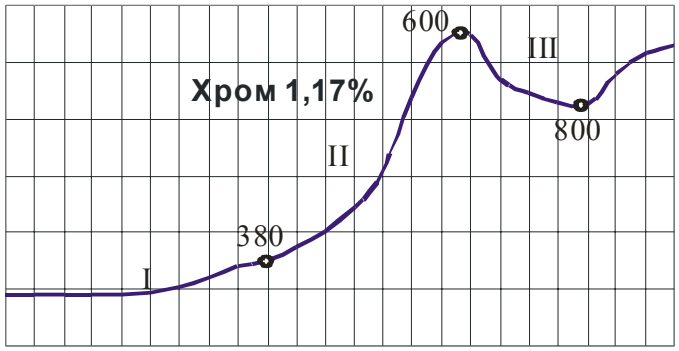


б)

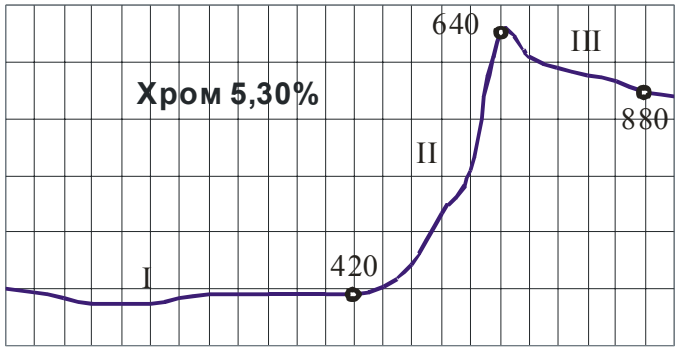


в)

 ISSN 1991-7848



г)



д)

Рисунок 7 - Кривые ДТА металла опытных плавок

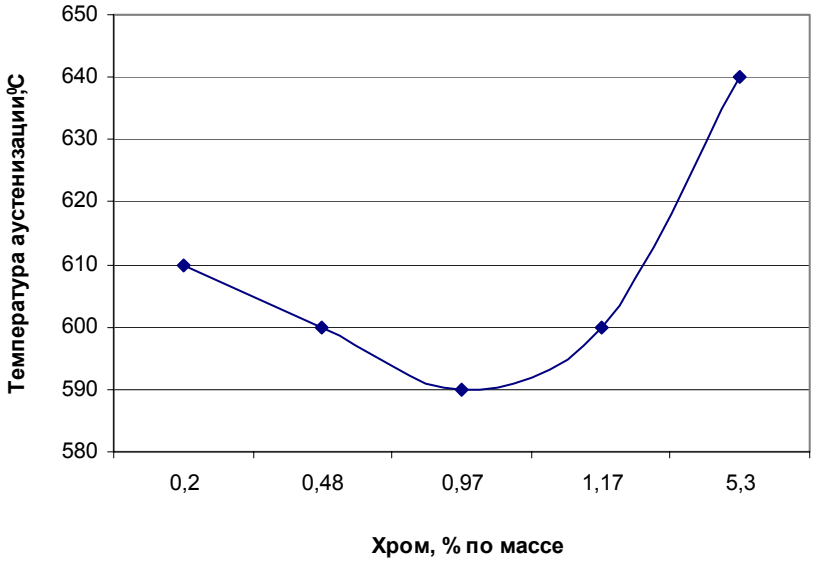


Рисунок 8 – Влияние хрома на температуру начала образования аустенита

Выводы

1. Увеличение концентрации хрома в чугунах существенно повышает температуру начала газонасыщения, от 2800С для 0,2% Cr до 5100С для 5,3% Cr – в 1,7 раза. Газопоглощение обусловлено водородом, кислородом и азотом воздуха.

2. Можно предположить, что каждый процент хрома повышает жаростойкость чугуна ~400С.
3. Хром в концентрационном интервале 0,48...5,3% повышает начало процесса образования аустенита до 6400С, что оказывает положительное влияние на жаропрочность.
4. Начиная с концентрации 1,17% хром обеспечивает достаточно высокий комплекс эксплуатационных свойств.

ЛИТЕРАТУРА

1. К.П.Бунин, Ю.Н.Таран. Строение чугуна. М., «Металлургия», 1972, 160 с.
2. Цыпин И.И. Белые износостойкие чугуны. Структура и свойства. М.: Металлургия, 1983, 176 с.
3. Матвеева М.О., Шаповалова О.М. Влияние содержания хрома на структуру и свойства чугуна/ Ж. «Системные технологии». – 2005. - № 5 (40). – С.3-13.
4. Чугун: Справ. изд./ Под ред. А.Д.Шермана и А.А.Жукова. М.: Металлургия, 1991, 576 с.
5. Шаповалова О.М., Матвеева М.О. Влияние хрома на формирование графита в чугунах/ Ж. «Металловедение и термическая обработка металлов». – 2004. - № 4.- С.24-30.
6. Металловедение и термическая обработка стали: Справ. изд. – 3-е изд., перераб. и доп. В 3-х т. Т1. Методы испытаний и исследования/ Под ред. Бернштейна М.Л., Рахштадта А.Г. М.: Металлургия, 1983. 352 с.
7. Гельд П.В., Рябов Р.П. Водород в металлах и сплавах. М., Металлургия, 1974, с.134.
8. Фромм Е., Гебхард Е. Газы и углерод в металлах. М.: Металлургия, 1980, 711 с.
9. Новиков И.И. Теория термической обработки металлов. М.: Металлургия, 1986, 480 с.

 ISSN 1991-7848

УДК 621.74.002.6:669.131.7

В.Е. Хрычиков, Л.Х. Иванова

ТЕХНОЛОГИЯ ЛИТЬЯ ПРОКАТНЫХ ВАЛКОВ ИЗ КОМПЛЕКСНОМОДИФИЦИРОВАННЫХ ЧУГУНОВ

Постановка проблемы. Прокатные валки исполнения ЛШ-57 (ТУ У 27.1-00190319-1291-2002) отливают в Украине способом «полупромывки» [1]. Для заливки литейной формы применяют чугуны двух составов: основной (модифицированный магнием) - с содержанием кремния 0,8...1,2% и высококремнистый (металл «полупромывки») - с содержанием кремния 5...7%. Валковую литейную форму через тангенциальную литниковую систему заполняют основным металлом до уровня, превышающего верхний торец бочки валка на 250...350 мм. После этого следует временная выдержка для затвердевания отбеленного слоя, а затем осуществляют доливку валковой литейной формы высококремнистым чугуном [1].

Проведенными ранее в НМетАУ исследованиями [2-4] установлено благотворное влияние комплексного модификатора ФС30РЗМ30 на служебные свойства белого чугуна и технологичность литья при модифицировании больших масс металла. В отличие от модифицирования металлическим магнием применение комплексных модификаторов (КМ) не требует дополнительных устройств и не сопровождается пироэффектом и газовыделениями. В работе [5] был предложен способ литья прокатных валков из чугуна с шаровидной формой графита (ЧШГ): путем заполнения литейной формы чугуном, модифицированным сплавом редкоземельных элементов с магнием, до уровня, превышающего верхний край бочки на 250...350 мм с последующей «полупромывкой» высококремнистым расплавом, содержащим магний. Недостатком этого способа является загрязненность белого чугуна рабочего слоя валков магниевыми неметаллическими включениями.

Цель исследований - разработать технологию обработки валковых расплавов комплексными модификаторами.

Основные результаты. Проведенными лабораторными исследованиями были установлены остаточные содержания РЗМ, обеспечивающие хорошие механические и служебные свойства белого валкового чугуна, а также необходимые содержания модификаторов в чугуне сердцевины и шеек валков, обеспечивающие получение графита с фактором формы 0,8...0,9.

Учитывая все вышеизложенное, была разработана технология литья валков исполнения ЛШ-57 с использованием для модифицирования основного металла – КМ на базе РЗМ, а для металла “полупромывки” - КМ на базе магния и ферросилиция [6]. Способ включал раздельную обработку расплава чугуна для рабочего слоя валка (70...80% металла от общей массы

© ХРЫЧИКОВ В.Е., ИВАНОВА Л.Х., 2006

металла) и для сердцевины и шеек (20…30% металла от общей массы). В качестве модификатора для рабочего слоя валка исполнения ЛШ-57 использовали лигатуру ФС30РЗМ30 в количестве 0,75…1,5% от массы металла рабочего слоя валка, а для сердцевины валка – лигатуру КМг9 и ферросилиций марки ФС75 в количестве 0,8…1,2 и 6…7% от массы металла соответственно [7].

Технологический процесс получения валковых расплавов осуществляли следующим образом. Металл для формирования рабочего слоя по новой технологии в количестве 70…80% от общей массы выпускали при температуре 1683…1703К в ковш емкостью 30 т, на дно которого предварительно загружали комплексный модификатор марки ФС30РЗМ30 фракции 60…80 мм в количестве 0,75…1,5% от массы расплава. Металл для «полупромывки» выпускали при температуре 1683…1703К в 10-тонный ковш, в котором находились лигатура марки КМг9 и расчетное количество графитизирующего модификатора - ферросилиция марки ФС75-2 ГОСТ ДСТУ4127:2002 для увеличения содержания кремния в чугуне до 5…7%. После удаления шлака и доводки металлов по температуре заливку валковых литейных форм осуществляли методом «полупромывки».

При установлении необходимых количественных и временных параметров способа изготовления прокатных валков исходили из следующего.

Повышение механических и служебных свойств материала рабочего слоя валка, возможно при замене сотовой ледебуритной эвтектики на пластиночную. Было установлено, что полное подавление выделения сотового ледебурита в белом чугуне происходит при содержаниях 0,20…0,30% РЗМост. Таким образом, учитывая, что усвоение РЗМ составляет в среднем 50…60% количество комплексного модификатора для обработки основного металла должно быть 0,75…1,5% от массы расплава. Присадка его в количестве меньше, чем 0,75% приводит к получению в чугуне остаточного содержания РЗМ менее 0,2% и, как следствие, к неподавлению выделения ледебурита и не достижению поставленной цели. Увеличение же присадки КМ свыше 1,5% приводит к получению в чугуне остаточного содержания РЗМ свыше 0,3% и образованию большого количества неметаллических включений, снижающих физико-механические и специальные свойства белого чугуна.

Установлено также, что максимальную прочность чугуна в шейках и сердцевине валка можно получить при комплексном модифицировании его РЗМ и магнием при содержании кремния в количестве 1,8…2,0%. Остаточные содержания РЗМ и магния в шейках и сердцевине валка должны быть 0,09…0,12% и 0,015…0,020%, соответственно, что обеспечивает получение перлито-графитного чугуна с фактором формы графита 0,85…0,95. Снижение остаточных содержаний РЗМ и магния ниже 0,09 и 0,015%, соответственно, приводит к ухудшению фактора формы графита и снижению прочностных характеристик. Повышение же

 ISSN 1991-7848

содержания РЗМ и магния выше верхних пределов приводит к получению разветвленных графито-аустенитных колоний с тонко дифференцированным графитом, в значительной степени ослабляющих рабочее сечение прокатного валка, что сопровождается снижением прочностных характеристик чугуна [8].

Таким образом, исходя из изложенных выше предпосылок необходимости содержания кремния в шейках и сердцевине валка в пределах 1,8…2,0%, РЗМ 0,09…0,12, магния 0,015…0,020% и степени усвоения модификаторов в пределах 45…60% были определены величины их присадок. Так, для получения в шейках и сердцевине валка содержания кремния 1,8…2,0% необходимо во втором металле (25…30% расплава) иметь кремния в количестве 6,0…7,0%, а смешение основного металла (не содержащего магния) со вторым металлом (не содержащим РЗМ) позволит получить в шейках и сердцевине необходимые их соотношения.

Соотношение количеств металлов основного (первого) 70…75% и второго 25…30% выбрано из следующих соображений. Минимальный уровень основного металла, необходимого для формирования рабочего слоя в валковой форме, должен быть выше уровня кокиля, формирующего бочку валка, то есть должен поступить в форму верхней шейки. Уровень подъема основного металла в форме верхней шейки ограничили 0,22…0,28 от ее высоты, исходя из необходимости иметь объем формы для принятия второго металла. В случае если уровень основного металла будет выше или ниже выбранных пределов, то не будут достигнуты необходимые соотношения РЗМ и магния, а также кремния в сердцевине и шейках валка.

Для определения продолжительности выдержки перед заливкой второго металла была проведена серия экспериментов по замеру скорости кристаллизации расплава в валковой форме (табл. 1). В результате эксперимента определили, что время затвердевания металла рабочего слоя валков различных размеров, то есть выдержку основного металла в литейной форме до подачи второго металла следует определять по формуле $\tau = 430D$ (τ – время, с; D – диаметр валка, м).

При определении основных температурных параметров литья исходили из следующего. В проведенных нами исследованиях была установлена температура заливки расплава в литейную форму на уровне - 1623…1633К. Так как потери тепла при вводе РЗМ с кремнием незначительны [2], то в работе [4] оптимальной температурой модифицирования чугуна КМ для условий вальцелитейного производства (температура модифицирования в пределах от 1633 до 1713К) была принята температура 1673…1693К, при условии, что промежуток времени между модифицированием и заливкой литейной формы минимальный. Исследование же влияния размеров фракции КМ в пределах от 30 до 120 мм при вводе его на дно заливочного ковша перед выпуском в него расплава из плавильного агрегата на коэффициент усвоения РЗМ при

постоянной величине присадки показало, что оптимальной была фракция модификатора – 60...80 мм.

В производственных условиях отлили опытные партии прокатных валков исполнения ЛШ-57. В качестве шихтовых материалов применяли передельный и литейный чугуны, стальной лом. Масса выплавляемого металла была 32 т. При достижении расплавом температуры 1683 5К 24 т чугуна (0,75% от общей массы расплава в печи) выпускали в 30-тонный разливочный ковш. Предварительно на дно ковша загружали необходимое количество лигатуры ФС30РЗМ30 (табл. 2) - 240 кг (1%), а оставшиеся 8 т металла выпускали в 10-тонный ковш с загруженными в него расчетными количествами ферросилиция (520 кг) и лигатуры КМг9 (80 кг).

Заливку валковых форм производили сначала из 30-тонного ковша до уровня, указанного в табл. 3, а затем после выдержки, рассчитанной по вышеприведенной формуле, заливали второй металл из малого ковша. Температура металла при заливке выдерживали в пределах 1613...1623К (табл. 4). Время от выпуска металла из печи до заливки литейных форм не превышало 20...25 мин.

Исследование микроструктуры материала валков серийного производства и опытных проводили на образцах от бочек и шеек, отрезанных при их механической обработке, а также на дисках, отобранных при разрезке валка-представителя опытной партии.

Микроструктура рабочего слоя валков представляла собой конгломерат карбида и продуктов распада аустенита. При близком химическом составе в микроструктуре рабочего слоя валка-представителя опытной партии графит отсутствовал, в то время как в валке текущего производства количество его составляло от 0,4 на глубине 10 мм до 2,5% - на глубине 20 мм.

Строение перлита в рабочем слое валка опытной партии характеризовалось баллами ПД1,0 и ПД0,5, а в валке текущего производства - ПД1,0Р и ПД1,4Р. С удалением от поверхности дисперсность перлита увеличивалась, причем в валке-представителе опытной партии дисперсность перлита оставалась на балл выше. Анормальность в строении перлита на глубинах 10 и 20 мм, соответственно, была в валке текущего производства Па4 и Па3, а в опытных валках - Па3 и Па2. С удалением от поверхности анормальность снижалась до Па1.

Количество структурных составляющих в рабочем слое опытного валка и текущего производства было примерно одинаковым. Различие состояло в том, что в опытном валке микроструктура была более равномерной, а количество феррита было меньшим. Модифицирование расплавов КМ позволило снизить количество и размеры видимых неметаллических включений в рабочем слое опытных валков (табл.5).

Материалы шеек валков опытного и текущего производства имели перлито-графитную структуру с небольшими количествами феррита и цементита. В опытном валке перлит на всех исследованных расстояниях от

 ISSN 1991-7848

поверхности шейки имел тонкое строение и характеризовался баллом ПД0,5, в то время как в валке текущего производства баллами ПД0,5 и ПД1,0.

Фактор формы графитных включений улучшался в опытном валке с удалением вглубь от литой поверхности и достигал примерно таких же значений, как и в валках текущего производства. Полученные остаточные содержания РЗМ и магния привели к кристаллизации в нижней шейке опытного валка графита шаровидной формы с фактором формы 0,81…0,84. Для материала шеек валков из чугуна, модифицированного магнием, характерным было значительно большее (на 8…60%) количество феррита и несколько меньшее, чем в опытном валке, количество цементита. Кроме того, в комплексномодифицированном чугуне шаровидные включения графита имели меньший диаметр и распределены они были более равномерно.

Механические свойства рабочего слоя валка-представителя опытной партии были значительно более высокими, чем у валка близкого химического состава, отлитого из магниевого чугуна. Так, на глубине 10 мм пределы прочности $\sigma_в^{изг}$ и $\sigma_в^{р}$ опытного валка были на 15…25% выше, чем у валка текущего производства (рис. 1 и 2). С удалением от поверхности пределы прочности $\sigma_в^{изг}$ и $\sigma_в^{р}$ чугуна опытного валка оставались выше, чем у валка текущего производства. И только на расстояниях более 170 мм от поверхности бочки в глубь, преимущественно в верхних частях бочек, прочность чугуна опытных валков была на 10…15% ниже, чем чугуна валков текущего производства. Это было обусловлено лучшей формой графитных включений и меньшим количеством цементита в магниевом чугуне.

Аналогичная зависимость наблюдалась и для показателя ударной вязкости. В отбеленном рабочем слое, переходной зоне и серой части бочки до глубин 160 мм ударная вязкость опытных валков была выше, чем в валках текущего производства. Кроме того, как указывалось выше, рабочий слой опытных валков содержал значительно меньшее количество неметаллических и графитных включений, что обеспечивало повышение твердости при практически одинаковом с магниевыми валками химическом составе чугуна валков.

Предел прочности при растяжении по всему сечению шеек как нижних, так и верхних, был на 10…20% выше в опытных валках, в то время как предел прочности при изгибе на глубинах 50…120 мм в валках текущего производства был выше, чем в опытных на 5…10%, а на глубинах до 50 мм и 120…200 мм прочностные характеристики материала опытных валков были выше.

Ударная вязкость чугуна опытных валков в поверхностных слоях шеек (до 75 мм) была выше, чем в валках текущего производства, а в более глубоких слоях, где в структуре чугуна шеек было несколько большее

количество цементита, ударная вязкость чугуна магниевых валков была выше.

В результате проведенных исследований установлено, что предложенный способ изготовления прокатных валков исполнения ЛШ-57 обеспечивал снижение модуля упругости материала рабочего слоя валков на 13,2...18,1% и повышение теплопроводности на 10,5...26,3% (табл. 6).

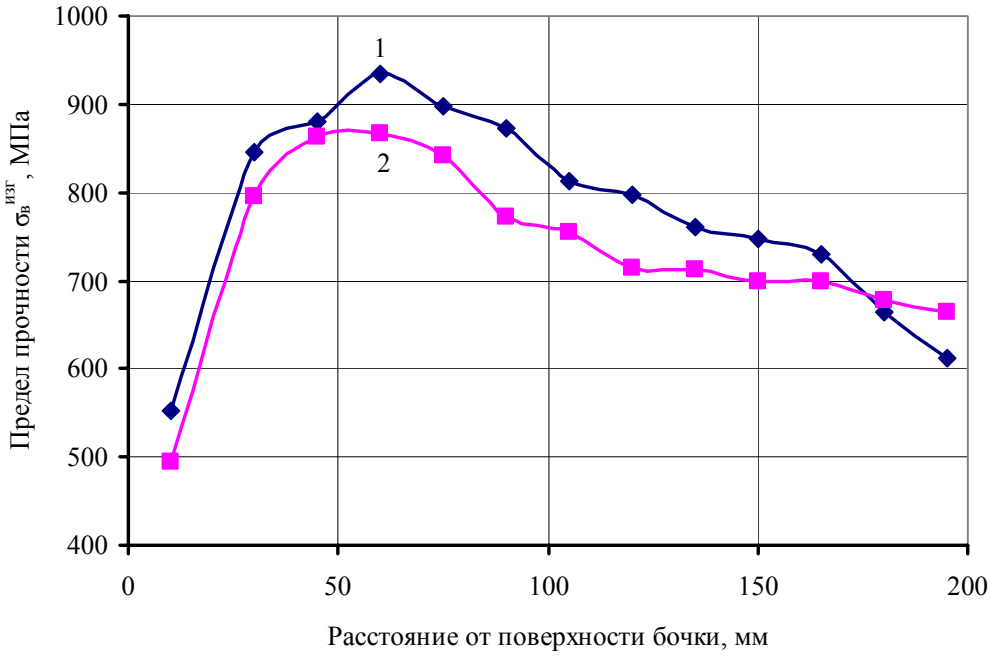


Рисунок 1 - Изменение прочности при изгибе по толщине бочек валков: опытного (1) и серийного производства (2)

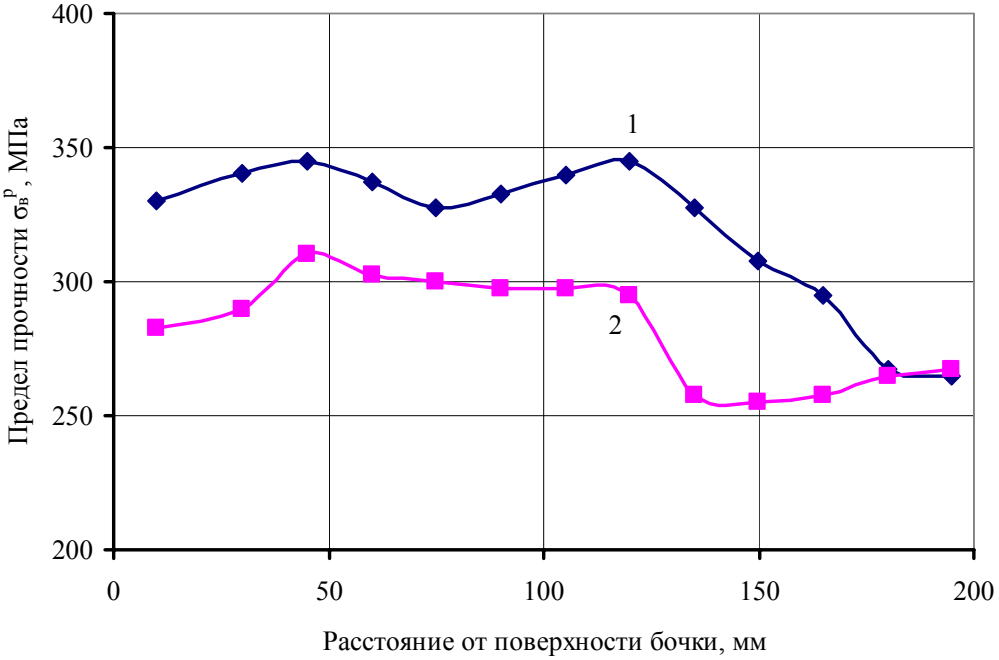


Рисунок 2 - Изменение временного сопротивления по толщине бочек валков: опытного (1) и серийного производства (2)

 ISSN 1991-7848

Таблица 1

Продолжительность затвердевания рабочего слоя отливок валков

Диаметр валка D, м	0,35	0,45	0,73
Продолжительность затвердевания рабочего слоя (40 мм), с	140-160	190-210	300-320

Таблица 2

Составы применяемых модификаторов и ферросплавов

Тип	Содержание химических элементов, масс. %				
	$\sum$ РЗМ	Mg	Si	Al	Fe
ФС30РЗМ30 (А)	30-40	-	30-50	2-4	ост.
КМг9	-	6-8	30-50	-	ост.
ФС75-2	-	-	74-80	$\leq$1,5	ост.

Таблица 3

Параметры изготовления валков текущего производства и опытных

Номер партии валков	Количество металла, %		Расход присадок, % по массе				Уровень заполнения формы верхней шейки основным металлом
	основного	сердцевины и шеек	ФС30РЗМ30	КМг9	ФС75Л	Мг90	
Опытные плавки							
1	70	30	0,75	0,8	6,0	-	0,22
2	72	28	1,50	1,2	7,0	-	0,28
3	80	20	1,00	1,0	6,5	-	0,35
4	72	28	2,00	1,5	8,0	-	0,28
5	72	28	0,50	0,5	5,0	-	0,28
Плавки текущего производства							
6	70	30	-	-	7,5	0,4	0,22
7	75	25	-	-	8,5	0,4	0,22

Таблица 4

Химический состав чугуна валков опытных и текущего производства

Номер партии валков	Химический состав чугуна, масс. % [1)]								Температура, К	
	C	Si	Mn	P	S	$РЗМ_{ост}$	Mg	Fe	модифицирования	заливки
1	3,11	$\frac{1,00}{1,90}$	0,55	0,12	0,01	$\frac{0,21}{0,08}$	$\frac{-}{0,025}$	ост.	1673	1613
2	3,12	$\frac{1,10}{1,98}$	0,58	0,11	0,008	$\frac{0,30}{0,09}$	$\frac{-}{0,030}$	ост.	1673	1623
3	3,13	$\frac{1,10}{1,60}$	0,51	0,14	0,01	$\frac{0,25}{0,11}$	$\frac{-}{0,018}$	ост.	1683	1613

4	3,11	0,97 / 2,28	0,56	0,12	0,01	0,41 / 0,20	– / 0,020	ост.	1673	1613
5	3,10	0,99 / 1,65	0,52	0,12	0,01	0,14 / 0,07	– / 0,010	ост.	1683	1623
6	3,10	0,99 / 1,95	0,55	0,11	0,01	-	0,04	ост.	1743	1613
7	3,12	1,05 / 1,98	0,56	0,13	0,01	-	0,04	ост.	1743	1613

Примечание. [1)] Значения в числителе относятся к материалу рабочего слоя, в знаменателе – к шейкам.

Таблица 5

Неметаллические включения в рабочем слое валков серийного производства и опытного

Номер партии валков	Расстояние от поверхности, мм	Площадь, занимаемая включениями, %	Количество неметаллических включений (шт/мм^2) в зависимости от их размеров, мкм							Средний размер включений, мкм
			0,27 - 0,56	0,57-1,12	1,13-2,24	2,25-4,48	4,49-8,96	8,97-17,92	свыше 17,92	
2	5	0,374	16,8	31,6	54,0	65,9	38,2	2,24	2,52	3,20
	10	0,99	23,8	28,0	38,7	51,3	41,2	7,56	2,78	3,62
	15	1,38	21,0	32,2	38,4	37,8	40,4	12,6	5,04	4,05
6	5	0,12	6,17	21,3	26,9	9,8	2,8	0,56	1,12	2,11
	10	0,162	12,6	24,9	27,1	15,95	1,12	0,56	0,56	1,81
	15	0,52	23,0	52,3	51,25	35	12,9	8,4	0,53	2,54

Таблица 6

Служебные свойства материала рабочего слоя исследуемых валков

Номер партии	Свойства материала рабочего слоя валков				
	Модуль упругости, МПа	Теплопроводность _кал_ см с оС	Износ (мг/см 2) на пути изнашивания		Термостойкость, см -1
			250 м	500 м	
1	185000	0,115	17,7	31,5	0,76
2	180000	0,12	16,4	29,9	0,63
3	180100	0,11	17,0	31,2	0,72
4	180500	0,11	16,1	29,1	0,69
5	191000	0,105	23,3	44,2	0,98
6	220000	0,09	21,0	36,9	0,95
7	218000	0,095	20,8	37,0	0,94

При испытании термо- и износостойкости было показано, что модифицирование КМ обеспечивало повышение этих показателей в белых валковых чугунах: термостойкость повышалась на 11…33%, а износостойкость на 17…25% (при среднем значении). С увеличением пути

 ISSN 1991-7848

изнашивания износ модифицированного КМ рабочего слоя уменьшался на 12…17% по сравнению с износом чугуна рабочего слоя валка текущего производства. Повышение износостойкости достигалось, по-видимому, за счет получения в рабочем слое валков белого чугуна, более чистого от неметаллических и графитных включений), а также за счет измельчения карбидной фазы и продуктов распада аустенита. Оптимальная микроструктура, которая была получена на лабораторной стадии работы и состоящая из ледебурита пластиночного типа и перлито-ферритной матрицы, в опытных валках была получена на расстояниях 15…20 мм от поверхности бочки.

Опытно-промышленная партия прокатных валков при эксплуатации в условиях листопрокатного стана показала повышение стойкости на 22…29%.

Выводы

1. Усовершенствована технологическая схема модифицирования расплавов комплексными модификаторами на основе редкоземельных металлов для получения прокатных валков из чугуна с шаровидным графитом исполнения ЛШ-57. Оптимальный расход лигатуры ФС30РЗМ30 для модифицирования металла рабочего слоя должен быть 1,0…1,25%, а лигатуры КМг9 для металла промывки – 0,8…1,2%.

2. Достигнуто улучшение микроструктуры материала опытных валков по сравнению с валками текущего производства. В опытных валках микроструктура чугуна рабочего слоя валков была более равномерной, а количество феррита и видимых неметаллических включений было меньшим. Фактор формы графитных включений во всех опытных валках находился примерно на одном уровне и составлял 0,8…0,9 – в сердцевине и шейках, 0,7…0,8 – в рабочем слое.

3. Применение комплексных модификаторов значительно упрощает технологию получения модифицированного валкового расплава и сокращает продолжительность плавки за счет более низкой температуры выпуска расплава из плавильного агрегата, а также по сравнению с процессом модифицирования чугуна магнием позволяет устранить пироэффекты и дымогазовыделения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кривошеев А.Е. Литые валки (теоретические и технологические основы производства).- М.: Металлургиздат, 1957.- 360 с.
2. Белай Г.Е. Исследование влияния модифицирования на кристаллизацию чугуна, структуру и свойства листопрокатных валков: Дис. … канд. техн. наук: 05.323.–Д., 1967.- 298 с.
3. Николаев Н.А. Исследование влияния химического состава и некоторых технологических факторов на качество листопрокатных валков: Автореф. дис. … канд. техн. наук: 05.323/ Днепропетр. металлург. ин-т.-Д., 1968.- 21 с.

4. Колотило Е.В. Исследование и усовершенствование процессов производства листопрокатных валков из модифицированных чугунов: Дис. ... канд. техн. наук: 05.16.04. - Д., 1977.- 207 с.
5. Способ отливки прокатных валков: А.с. 214555. СССР. МКИ С21С 1/10 / А.Е.Кривошеев, В.Е.Карсский, А.М.Паршин и др.-№ 921556/22-02; Заявл.05.09.64 ; Опубл.29.03.68. Бюл. №12.- 2 с.
6. Способ обработки чугуна при изготовлении прокатных валков: А.с. 1311846. СССР. МКИ В 22 D 19/16 / Е.В.Колотило, Л.Х.Иванова, И.И.Ануфриев др.-№ 3821258/22-02; Заявл. 10.12.84; Опубл. 23.05.87. Бюл. №19.- 3 с.
7. Колотило Е.В., Иванова Л.Х., Бунина Ю.К. Технология производства прокатных валков из комплексномодифицированных чугунов с шаровидной формой графитных включений // Теория и практика металлургии. - 2000.- № 6.- С.45-49.
8. Проблемы получения чугуна с шаровидным и вермикулярным графитом в условиях вальцелитейного производства/ Е.В.Колотило, Л.Ф.Боков, Л.Х.Иванова, Н.Г.Мороз// Прогрессивные технологические процессы и охрана труда в литейно-металлургическом производстве. – Нижний Новгород, 1991. – С.19-20.

 ISSN 1991-7848

УДК 669.046.55

О.Н. Кукушкин, С.В. Бейцун, Н.В. Михайловский

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ КОВШОВОГО ВАКУУМИРОВАНИЯ

В настоящее время внепечная вакуумная обработка стали продолжает развиваться как во всем мире, так и в Украине. К наиболее перспективным способам вакуумирования с точки зрения экономичности и эффективности удаления неметаллических включений относится вакуумирование жидкой стали в ковше с продувкой инертным газом. За последние 10 лет на металлургических предприятиях Украины установлены три вакууматора камерного типа. В соответствии с Государственной программой развития горно–металлургического комплекса Украины до 2010г. планируется установка комплексов вакуумной обработки стали на целом ряде предприятий [1].

Создание предпосылок для применения автоматизированной системы управления процессом ковшового вакуумирования стали требует обеспечения непрерывного контроля уровня металла в ковше с целью предотвращения выплесков, прогнозирования изменения температуры стали во время внепечной обработки и концентрации растворенного водорода в ходе вакуумирования на основе создания адекватных математических моделей процесса.

С целью экономии энергетических ресурсов необходимо провести подготовку стали к вакуумированию за минимально возможное время с минимальными тепловыми потерями и закончить сам процесс вакуумирования до достижения заданной температуры. Таким образом температура расплава является фактором, ограничивающим длительность вакуумирования. Минимальная длительность вакуумной обработки определяется требуемым содержанием в стали растворенных неметаллических включений и газов (в частности, водорода, концентрация которого в расплаве после вакуумирования не должна превышать $2 \cdot 10^{-4}$ % [2]). Сократить необходимое для получения заданной концентрации водорода время вакуумной обработки можно только интенсифицировав продувку стали инертным газом, одновременно гарантируя отсутствие выплесков расплава из ковша.

Основное ограничение технологии внепечной обработки стали в ковшах – обеспечение температуры стали перед разливкой в заданном диапазоне. В результате анализа и обработки данных натурных исследований, проведенных на вакууматоре сталеразливочных ковшей ОАО «Нижнеднепровский трубопрокатный завод» (НТЗ), авторами получены математические модели для прогноза изменения температуры расплава при подготовке к вакуумированию первого и второго ковшей в зависимости от

© КУКУШКИН О.Н., БЕЙЦУН С.В., МИХАЙЛОВСКИЙ Н.В., 2006

массы и начальной температуры налитой в них стали, а также от температуры футеровки ковшей перед выпуском [3].

Для комплексной оценки длительности различных операций и теплового баланса при их выполнении нами разработана событийно–имитационная модель функционирования всего участка, реализованная в пакете STATEFLOW [4]. Для адаптации модели к конкретным производственным условиям используются результаты измерения температуры расплава в ковше по окончании выпуска, перед началом и по окончании обработки на установке «ковш–печь», перед началом и по окончании вакуумирования, которые проводятся в соответствии с используемой технологией внепечной обработки на НТЗ.

Прогнозирование температуры в ходе внепечной обработки сократит технологические паузы, связанные с проведением замеров температуры расплава, что ускорит его нагрев на установке «ковш–печь». Это позволит снизить затраты энергоресурсов и расход блоков термоэлектрических преобразователей.

Рассмотрим основные стадии процесса вакуумирования с точки зрения обеспечения качества процесса.

Набор вакуума. Скорость набора вакуума ограничена сверху интенсивным выделением растворенных газов даже при незначительном перемешивании (расход аргона на продувку 20...40 л/мин). При высокой скорости набора вакуума уровень ванны резко поднимается, это инициирует выплески расплава на защитный экран вакуумной камеры, что может привести к его свариванию с обечайкой ковша. Как показало моделирование [5], избежать чрезмерно активного удаления газов можно при наборе рабочего значения вакуума (3 гПа) за 9...12 мин, что особенно важно для ковшей с малым запасом высоты ковша (массой жидкой стали до 120 т). Это соответствует сложившейся на предприятии технологии.

Резерв сокращения времени набора вакуума, который важен для снижения общего времени выдержки ковша в вакуум–камере и связанных с этим тепловых потерь, может быть использован при организации автоматического контроля за уровнем ванны. Эту задачу, как показал положительный опыт реализации нашей разработки [6], целесообразно решать с помощью радиолокационных измерительных систем уровня. При этом особенно эффективно (на 1...2 мин) можно сократить длительность набора вакуума для ковшей с уменьшенным наливом и большим запасом высоты ковша. Тем более, для них особенно важно снижение тепловых потерь расплавом.

Рабочий режим вакуумирования. Основным режимным параметром является расход аргона на продувку ванны. Минимальная величина расхода определяется необходимостью организации полного перемешивания в ковше и, по нашим данным, это время не превышает 2 мин при минимальном расходе аргона на продувку. Увеличивать расход аргона необходимо при достижении рабочего разрежения в вакуум–камере

 ISSN 1991-7848

значения 3 гПа, после уменьшения колебаний поверхности, вызванных выделением растворенных в расплаве газов. Иначе на поверхности ванны возникнут волны, дополнительно возбуждаемые выходящими пузырями инертного газа, что может привести к выплескам расплава.

В настоящее время операторы вакуумной установки изменяют расход аргона ступенями в диапазоне от 20 до 200 л/мин, основываясь на своем опыте управления процессом вакуумирования. В принципе, можно оптимизировать переключение ступеней расхода аргона как во времени, так и по величине программным путем. Однако в реальных условиях, когда ковши имеют различное наполнение и, кроме того, невозможно лимитировать количество вводимых добавок, программное управление процессом нерационально. На этом этапе задача автоматизации управления расходом аргона может быть решена только с использованием информации о текущем уровне ванны. При этом целесообразно не стабилизировать уровень ванны на какой–то заданной величине запаса высоты ковша, а совместно использовать информацию как о средней величине уровня, так и о его высокочастотных колебаниях, вызванных барботажем и волнением поверхности. Предлагается осуществить компьютерную обработку сигнала о текущем уровне расплава в ковше, выделить его среднее значение и отдельно – амплитуду колебаний поверхности расплава. Далее целесообразно оператору установки ковшового вакуумирования индицировать на мониторе график изменения во времени среднего значения уровня с наложенным диапазоном колебаний. Пример представления данной информации приведен на рисунке.

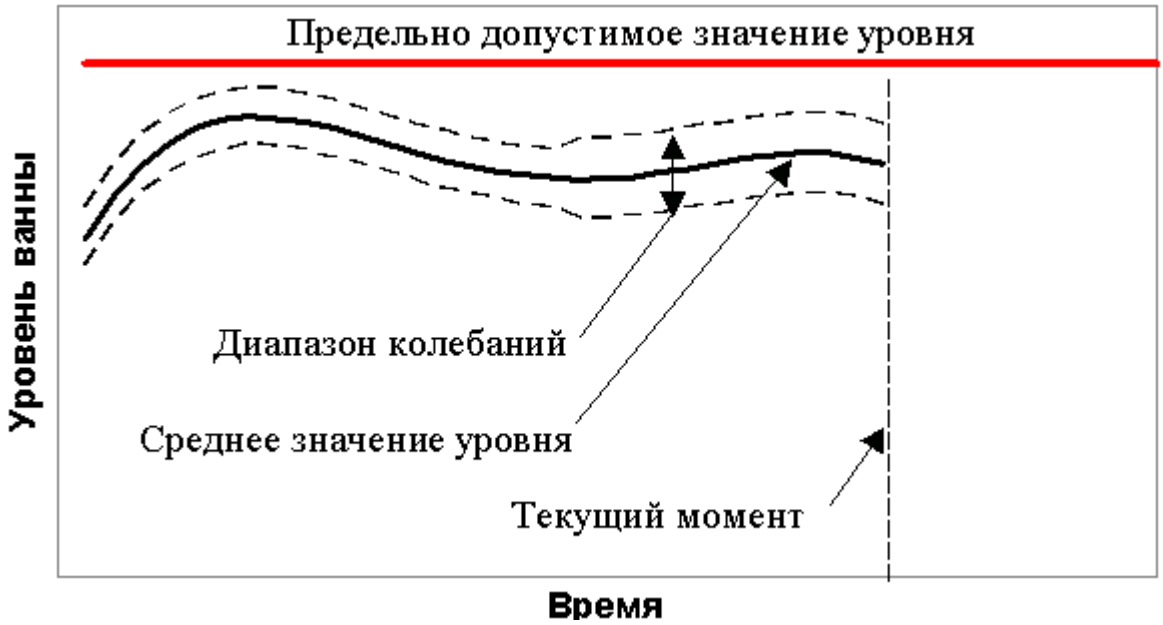


Рисунок – График изменения во времени среднего значения уровня с наложенным диапазоном колебаний

Тревожным сигналом для оператора является приближение верхней границы диапазона колебаний к предельно допустимому значению.

Индикация амплитуды высокочастотных колебаний дает оператору дополнительную информацию об интенсивности перемешивания ванны и ее дегазации. Такой алгоритм управления позволяет в каждый момент времени реализовать максимально возможный расход аргона, что обеспечит наиболее интенсивное удаление из расплава растворенного в нем водорода.

При предлагаемом способе управления расходом аргона возникает дополнительный положительный эффект. Поскольку оператор (или автоматическая система) будет увеличивать расход аргона таким образом, чтобы верхняя граница диапазона колебаний расплава приближалась к предельному значению уровня, то уровень ванны в ходе вакуумирования будет изменяться в более широких пределах, что будет способствовать уменьшению износа шлакового пояса футеровки ковша.

Остановка процесса. Для определения момента остановки процесса вакуумирования следует использовать модель прогноза изменения концентрации водорода по ходу вакуумной обработки стали [7]. Входной величиной данной модели является начальная концентрация растворенного водорода, которая измеряется непосредственно перед вакуумированием с помощью системы Hydris. Если такая информация отсутствует, то длительность процесса вакуумной обработки первого ковша плавки необходимо выбирать с некоторым запасом, ориентируясь на максимально возможную в данных условиях концентрацию водорода в расплаве, а время обработки второго ковша той же плавки скорректировать по результатам химического анализа обработанного первого ковша.

В результате анализа экспериментальной информации установлено, что 3 % ковшей по окончании внепечной обработки имели температуру металла ниже требуемой. В этих ситуациях ковш дополнительно перед разливкой подогревали. Также установлено, что после обработки около 17 % ковшей температура металла в них была выше требуемой. В этих ситуациях увеличивали продолжительность очистительной продувки после вакуумирования до достижения расплавом требуемой температуры.

Согласно данным промышленных экспериментов, приблизительно 75 % ковшей после вакуумной обработки имели концентрацию водорода менее $1{,}6 \cdot 10^{-4}$ %. В результате математического моделирования установлено, что в среднем для таких ковшей время вакуумной обработки можно сократить приблизительно на 10 %. При невозможности определения содержания водорода в расплаве перед вакуумированием, прогнозирование удаления водорода в зависимости от предполагаемого режима обработки позволит экономить до 4 % времени на вакуумировании вторых ковшей с учетом результатов обработки первых ковшей.

На основании проведенных авторами экспериментальных и теоретических исследований особенностей процесса вакуумирования сталеплавильных ковшей определены задачи автоматизации участка внепечной обработки стали, сформулированы технологические требования к

 ISSN 1991-7848

системам автоматического контроля и управления агрегатами и разработаны предложения по режимам ковшового вакуумирования.

С использованием полученных математических моделей разработана и предложена к внедрению на НТЗ автоматизированная информационно–советующая система участка внепечной обработки стали «АИС УВОС». Эта система позволяет прогнозировать изменение температуры расплава во время внепечной ковшовой обработки, изменение уровня металла в ковше во время вакуумирования, изменение концентрации растворенного в стали водорода в зависимости от продолжительности и режимов вакуумной обработки.

В результате оценки технико–экономической эффективности системы «АИС УВОС» ожидаемый годовой экономический эффект определяется суммой 1,6 млн.грн., что при планируемых затратах 0,4 млн.грн. обеспечит быструю окупаемость системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бойченко Б.М., Поляков В.Ф., Лесовой В.В. Состояние и перспективы сталеплавильного производства Украины // Сучасні проблеми металургії. Том 3. Матеріали науково–практичної конференції «Проблеми і перспективи одержання конкурентноздатної продукції в гірничо-металургійному комплексі України» (24–25.10.2000 р.). – Дніпропетровськ: «Системні технології», 2001. – С.192–207.
2. Кирсанов В.М., Дерюгин А.А., Смоктий В.В. и др. Динамика поведения концентрации водорода при вакуумировании колесной стали // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 1998. – № 4. – С.15–17.
3. Прогнозирование изменения температуры расплава во время вакуумной обработки стали / С.В. Бейцун, А.В. Жаданос, Н.В. Михайловский, С.В. Шаталюк // Металургія. Збірник наукових праць. – Запоріжжя: ЗДІА, 2004. – Вип. 9. – С.33–38.
4. Кукушкин О.Н., Бейцун С.В., Жаданос А.В. Моделирование работы производственного участка средствами STATEFLOW // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наук. праць. – Краматорськ: ДДМА, 2002. – Вип. 12. – С.172–181.
5. Математическая модель изменения уровня металла при ковшовом вакуумировании / О.Н. Кукушкин, С.В. Бейцун, Н.В. Михайловский, Ю.А. Редичкин // Теория и практика металлургии. – 2003. – №1. – С. 27–32.
6. Микроволновые методы контроля технологических параметров / О.Н. Кукушкин, В.И. Головко, В.В. Смоктий и др. // Современные проблемы металлургии: Научные труды ГМетАУ. – Днепропетровск: ГМетАУ, 1999. – Вып. 1. – С.279–298.
7. Бейцун С.В., Михайловский Н.В. Моделирование удаления водорода из металла при ковшовой вакуумной обработке. // Материалы XXXI-й международной научно–технической конференции молодежи «Запорожсталь–2004».– Запорожье: ОАО «Запорожсталь». – 2004. – С.24.

УДК 621.396.969

А.А. Верховская, В.И. Головко, О.Н. Кукушкин, Н.В. Михайловский

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАДАРОВ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ГРОХОЧЕНИЕМ И ЗАГРУЗКОЙ ШИХТЫ В ДОМЕННУЮ ПЕЧЬ

Для забезпечення нормального ходу доменної печі необхідна оперативна зміна ефективності відсівання дрібних фракцій шихти. Запропоновано використання радарів для визначення профілю поверхні і розподілу по ній шихтових матеріалів з реалізацією способу корекції ходу доменної печі за рахунок зниження кількості дрібної фракції шихти, в залежності від опускання матеріалу в доменній печі. Показана перевага застосування радарних систем безперервної дії у порівнянні з іншими системами визначення профілю.

Для обеспечения нормального хода доменной печи необходимо оперативное изменение эффективности отсева мелких фракций шихты. Предложено использование радаров для определения профиля поверхности и распределения по ней шихтовых материалов с реализацией способа коррекции хода доменной печи путем изменения содержания мелкой фракции в шихте в зависимости от скорости опускания материала в доменной печи. Показано преимущество применения радарных систем непрерывного действия в сравнении с другими системами измерения профиля.

For providing of normal motion of blast-furnace it is necessary an efficient change of the sifting of charge shallow factions. Offered to use the radars of charge surface on top with correction of blast-furnace motion by dint of change of shallow faction maintenance amount charge in dependence on sinking speed of material in blast-furnace. The advantage of continuous radar systems of continuous action application in comparison with other profile determination systems is shown.

Важнейшим направлением развития металлургии является автоматизация контроля и управления технологическими процессами с применением компьютерной техники. Это определяет возможность достижения значительного экономического эффекта за счет сокращения расхода сырья, топлива, энергии и повышения качества продукции в условиях высокой материало- и энергоемкости металлургических процессов. Сдерживающими факторами автоматизации в доменном процессе являются разнообразие технологических процессов и агрегатов в условиях непрерывного поточного производства, сложность большинства металлургических объектов, которые подвергаются действию разнообразных внешних факторов и управляющих воздействий; отсутствие или существенные трудности реализации автоматического контроля многих параметров из-за сложности физико-химических процессов и критических техногенных условий. По мнению ряда исследователей [1], дальнейший рост производственных показателей металлургических агрегатов проблематичен без внедрения современных систем контроля, так как наблюдаемость многих параметров не удовлетворяет требованиям управления, а ряд важнейших из них не контролируется из-за отсутствия соответствующей техники.

© ВЕРХОВСКАЯ А.А., ГОЛОВКО В.И., КУКУШКИН О.Н.,МИХАЙЛОВСКИЙ Н.В., 2006

 ISSN 1991-7848

Поэтому особый интерес представляют работы по созданию и внедрению сенсорных систем на основе нетрадиционных для металлургии принципов технического зрения и очувствления (оптоэлектронной, инфракрасной, радиоволновой локации), проводимые в последние 10-15 лет в Украине России, Японии, Швеции, Германии и Китае. Исследования показали, что годовая потребность стран СНГ только в микроволновых (МКВ) средствах измерения расстояния (уровня) по металлургии, обогатительной, огнеупорной и коксохимической промышленности составляет более 400 комплектов.

В доменном производстве нерешенной остается задача определения профиля поверхности сыпучих тел. Актуальность этой задачи вытекает из взаимосвязи распределения материалов на поверхности засыпи столба шихты с физико-химическими процессами, характером тепловой работы печи и распределением газового потока. Показано [2] существенное влияние распределения шихты на состав колошникового газа в целом и его распределение по радиусу печи, состояние и работу зон горения. Информация о форме профиля позволяет к моменту загрузки в печь очередной порции материала оперативно прогнозировать ход доменного процесса (периферийный, нормальный, центральный либо другой) и изменение теплового состояния печи в комплексе с оценкой других технологических параметров.

Не меньшее значение имеет определение скорости схода, углов откоса, распределение шихты на колошнике по виду, крупности, толщины слоев и других производственных параметров. Наличие этих параметров обеспечивает осуществление своевременных и обоснованных управляющих воздействий, адекватных отклонениям технологического процесса.

Расчет профиля засыпи на основе математического моделирования остается проблематичным. Одной из причин является отсутствие обоснованной физической модели и не всегда оправданное применение положений механики грунтов, основанных на теории предельного равновесия и движения кусковых материалов. Сложность решения этой задачи определяется также неоднородностью состава материала, крупности, гранулометрии, пористости, влажности и других физико-химических свойств компонентов шихты. Так, например, колебания их объемной массы составляют: для агломерата 1,7…2,0 т/м^3, для кокса 0,36…0,53 т/м^3, известняка – 1,6…2,0 т/м^3.

Попытки создания профилемеров многочисленны и достаточно многогранны. Наиболее представительным классом таких устройств являются контактные механические средства измерения. Реализация устройств с применением механических зондов для определения профиля, существенным недостатком которых остается повышенная погрешность показаний и весьма сложный уход за зондами при работе печи на повышенном давлении, а применение ультразвуковых и вибрационных сигналов из-за мощных потоков запыленного газа, громоздкости,

сложности, недолговечности результатов не нашли практического применения.

За рубежом предпринимались попытки использования оптической техники (световой, лазерной и телевизионной), однако сведения об успешном их применении на промышленных объектах отсутствуют. Можно полагать, что, помимо влияния пылегазовых потоков в качестве мощных помех, существенным недостатком их использования является чрезвычайная сложность защиты оптической части систем и обработки сигналов в условиях ограничения временных интервалов получения исходной информации.

Применение систем инфракрасного излучения для определения профиля базировалось на попытках обосновать физическое распределение шихты на колошнике на основе информации о распределении температуры по поверхности материала в доменной печи [3]. Однако промышленные эксперименты ИЧМ с применением системы «Геомет-800» на ДП-3 АК «Тулачермет» не подтвердили этого предположения. Последняя из этих систем [4] позволяет выполнить лишь косвенный контроль ровности профиля и только вблизи стенки печи. При этом ее использование вне связи с рядом других измерений практически может завести технолога в тупик при попытке расшифровать полученную информацию для целей управления.

К 60-70-м годам относится появление различных вариантов следящих изотопных уровнемеров. Однако предназначение этих уровнемеров не позволяет решить задачу определения профиля засыпи, так как, независимо от количества установленных на колошнике печи датчиков, с их помощью фиксируется лишь положение максимальной по высоте точки поверхности («гребень засыпи»). При этом невозможно идентифицировать смещение гребня по радиусу печи и, следовательно, прогнозировать сход шихты при различной его скорости на периферии и в центральной части [5].

Помимо этих недостатков, определение гребня по заданному (опорному) значению поглощения материалом излучаемой энергии приводит к погрешности из-за усредненной величины собственно опорного значения при одновременном изменении формы гребня, вида материалов (или их смеси), а также фракционного состава, влажности и других параметров. Указанная погрешность еще более возрастает вследствие неточности определения положения приемника излучения в шахте доменной печи из-за изменения в процессе эксплуатации состояния электромеханической системы (кабель-тросы, барабан и привод лебедки, сельсин-приборы и другое оборудование). В результате, комплексная погрешность измерения может достигать ± 0,5 м.

Призванные устранить эти недостатки радиоактивные сканирующие системы отличаются аппаратурной сложностью, высокой стоимостью и опасностью для экологии и человека. Опыт их эксплуатации не позволяет

 ISSN 1991-7848

однозначно судить о положительных результатах измерения профиля поверхности шихты. По данным ЦНИИЧерМета им. И.П. Бардина, недостатками таких систем являются аппаратурная сложность, ненадежность обработки и представления информации, невозможность использования, для контроля распределения и скорости схода шихты, данных профилемера без их основательной математической обработки, малое быстродействие и ухудшение условий формирования резкой границы зон облучения и приема при увеличении размеров колошника при недостаточной коррозионной стойкости водоохлаждаемых элементов защиты.

Большое распространение в последние годы в промышленности получили микроволновые радары [6]. Перспективность широкого использования этих измерителей при контроле параметров металлургических процессов определяется их бесконтактностью, быстродействием, возможностью дистанционного управления параметрами радиосигналов. Важным фактором является высокая чувствительность при зондировании на расстоянии до 20 м различных материалов: проводников и диэлектриков, диамагнетиков, парамагнетиков и ферромагнетиков в широком диапазоне величины кусковатости, влажности и температуры материалов.

Наиболее перспективной в настоящее время является схема построения уровнемеров с применением СВЧ–генератора с качающейся частотой радиосигнала. В этом случае на выходе балансного смесителя, в результате смешивания падающей и отраженной от контролируемой поверхности радиоволн, образуются биения, частота которых пропорциональна расстоянию до поверхности материала. Необходимость таких средств определяет создание микроволновой системы измерения с применением не только принципов локации, но и радиоинтроскопии – сравнительно нового метода неразрушающего бесконтактного контроля материалов.

По назначению и условиям работы в металлургии средства радиолокационного измерения относятся к системам контроля с элементами автоматической диагностики их состояния, коррекции показаний при изменении условий внешней среды и состояния объекта наблюдения.

Эффективность использования радиолокационной системы для нормирования и отображения физической величины зависит от нали-чия в радиосигнале информации о параметрах объекта (удалении, скорости движения, форме, размерах, агрегатном состоянии и химическом составе) и возможности оценки этой информации на основе анализа параметров электромагнитной волны, отраженной от объекта с присущими ему электрофизическими свойствами.

При определенной достаточности данных по электрофизическим свойствам некоторых материалов (электрической и магнитной

проницаемости, тангенсу угла диэлектрических потерь, удельной проводимости), определяющих характер отражения электромагнитных волн, аналогичные сведения по металлургическим материалам отсутствуют. Это затрудняет даже приблизительную оценку их фактической отражательной способности, что усугубляется изменением их механических и электрофизических свойств во времени и пространстве.

На результат радиолокационного измерения влияют состояние и характер (неровность) отражающих поверхностей, изменение плотности, влажности и кусковатости материалов, особенно дисперсных, температуры, запыленности и загазованности среды распространения радиоволн. Из-за сложной поверхности в пятне лоцирования угол скольжения электромагнитной волны по этим причинам может изменяться от 0 до 90°.

При углах скольжения близких к прямому, возможно более интенсивное отражение от гладкой поверхности, чем от шероховатой, а при углах скольжения достаточно близких к нулю, возможен обратный эффект. Эту неоднозначность в определенной мере объясняет представление поверхности материалов в виде множества элементарных отражателей (фацетов), размеры которых соизмеримы с длиной волны. Поскольку положение этих фацетов относительно источника излучения волны в объеме радиолокационного наблюдения в каждый момент времени случайно, отражение части рассеянной энергии в направлении приемника подвержено флуктуациям.

При всей сложности практического применения физических законов отражения радиоволн в металлургии следует учитывать, что для материалов с чисто мнимым показателем преломления характерно практически 100%-ное отражение. Другими словами, если металлы хорошо отражают электромагнитные волны во всем диапазоне частот вплоть до оптического, то мнимая часть их показателя преломления очень велика, хотя это означает и сильное поглощение.

Определяя в качестве исходной информации для анализа параметров зондируемой среды мощность отраженного сигнала, заметим, что в металлургии, как правило, расстояние от приемопередающей антенны до объекта наблюдения значительно превышает длину волны λ излучения.

Полагая, что в пределах облучаемой области из-за скоротечности распространения волн в сравнении с временем переходных технологических процессов отражательные свойства поверхности существенно не изменяются и удельная эффективная площадь рассеивания (ЭПР) постоянна, можно установить связь между величиной мощности отраженного от поверхности сигнала и физико-математическими, электрофизическими параметрами отражающей поверхности с учетом расстояния до нее. Однако, неоднозначность величины принимаемой мощности ограничивает определение этих параметров. В этой связи определение расстояния до объекта при прохождении электромагнитной

 ISSN 1991-7848

энергии через газопылевые, газоводяные среды является одной из основных предпосылок применения системы.

Принципиальная возможность создания профилемеров на базе радиолокационных дальномеров определяется наличием информативного сигнала при микроволновом зондировании поверхности различных материалов, предельном изменении расстояния до поверхности, углов откоса материалов и соответствующих углов скольжения (встречи) электромагнитной волны с компонентами шихты.

Решение этой задачи неразрывно связано с вопросами обеспечения заданной погрешности измерения расстояния и минимизации времени сканирования. Согласно метрологическому обеспечению технологических процессов в черной металлургии, технологически допустимый предел производственного запаздывания информации для профилемеров достигает трех минут по доменным печам и большегрузным накопительным емкостям. При этом допустимая погрешность измерения уровня засыпи поверхности в доменном производстве составляет ± 0,1 м, а профиля поверхности ± 0,2 м, что ориентировочно соответствует двойному размеру максимального куска кокса.

Уклоны поверхности сыпучих материалов образуются за счет присущих им углов естественного откоса. Они возникают как при загрузке бункеров («конус засыпи») и шахтных печей («гребень засыпи»), так и при выпуске материалов («воронка выпуска»). Обычно величина угла откоса основных металлургических материалов колеблется от 30° до 43° к горизонтальной плоскости. Отклонение значений этих углов в ту или иную сторону является следствием физико-механических характеристик материала, формы и размеров емкостей, способов загрузки и выгрузки, интенсивности и методов проведения технологических процессов. В момент окончания загрузки материалов в доменную печь угол откоса засыпи может составлять более 26°.

Вместе с этим, увеличение угла откоса может привести к снижению величины угла скольжения и, как следствие, возникновению дополнительной погрешности при определении расстояний. Причиной может быть искажение информативной составляющей радиолокационного сигнала из-за эллипсообразной формы проекции диаграммы направленности антенны на наклонную поверхность материала. При этом мощность радиоволны, отраженной от ближней к антенне зоны лоцируемой площадки, может превышать отражение от дальней зоны, как из-за меньшего расстояния, так и вследствие местного увеличения угла скольжения. Хотя до 50% электромагнитной энергии излучения сосредоточено в центральной области (20% площади) апертуры антенны, в этом случае возможно возникновение систематической ошибки «в минус» по расстоянию, которую необходимо корректировать при обработке сигнала.

Определяя сегодня применение радарной техники как стандартной измерительной системы бесконтактного контроля уровня можно отметить, что порыв в решении этой проблемы связан с реализацией непрерывной радиолокации.Согласно оценке японских исследователей, в настоящее время наиболее приемлемыми для промышленного использования по сравнению с механическими, лазерными, изотопными и другими средствами измерения по совокупности показателей: надежности, сложности конструкции, монтажа и обслуживания, точностным характеристикам, экологической безопасности и стоимости, являются радары-дальномеры с маломощным непрерывным радиоизлучением и совмещенной антенной.

Система определения профиля засыпи шихты должна предоставлять технологическому персоналу данные об измеряемых профилях поверхности шихты в контролируемых сечениях, скоростях схода шихты в этих сечениях, о положении осевой воронки профиля засыпи, что позволяет оценить ход доменной плавки.

Проблема управления радиальным распределением шихтовых материалов по данным радиального газораспределения состоит в значительном запаздывании регулирующих действий из-за постепенного формирования соответствующей структуры столба шихты как решающего фактора процесса формирования газового потока. Это запаздывание может стать причиной недостаточной эффективности управления распределением шихты при нестабильном газодинамическом режиме доменной печи, то есть именно тогда, когда это управление крайне необходимо. Поэтому обеспечение высокой эффективности управления радиальным распределением шихты возможно за счет использования предусмотренных регулирующих действий. Необходимость в таком управлении возрастает по мере уменьшения потребляемого количества кокса как важного фактора влияния на газопроницаемость шихты и стабильность газодинамического режима доменной печи.

Существенным недостатком известных систем управления радиальным распределением шихты и газового потока является недостаточная их эффективность, в связи с отсутствием надежных средств контроля профиля поверхности шихты, и невысоким, в связи с этим, уровнем предусмотренных регулирующих действий.

Микроволновый бесконтактный метод с одной стороны обеспечивает минимальный контакт измерительного устройства с контролируемой средой, а с другой стороны – практически полностью нечувствителен к изменению ее температуры и давления. Причем и температура и давление могут иметь значения недопустимые для применения других методов, в первую очередь, контактных.

Идеальными для уровнемера с непрерывным частотно-модулированным излучением сигнала являются условия, когда поверхность контролируемой среды имеет достаточно большую площадь, на ней

 ISSN 1991-7848

отсутствуют какие-либо возмущения, а сам резервуар полностью свободен от каких-либо внутренних конструктивных элементов. Однако реальные условия сильно отличаются от идеальных и привносят дополнительные проблемы, связанные с образованием большого числа паразитных эхо-сигналов от элементов конструкций, неровностей поверхности (особенно при контроле сыпучих материалов) и т.п. Кроме того, прием и передача сигнала осуществляются одновременно. В результате на входе приемника уровнемера присутствует ложная смесь сигналов с очень большим разбросом по амплитуде. Для выделения частот эхо-сигналов применяется алгоритм, основанный на методе быстрого преобразования Фурье. Для его реализации требуются значительные вычислительные ресурсы и относительно продолжительное время. Результатом преобразования является частотный спектр принятого сигнала, в котором относительная амплитуда каждой частотной составляющей пропорциональна мощности конкретного эхо-сигнала, а величина частотного сдвига пропорциональна расстоянию источни-ка этого эхо-сигнала от излучателя. Выделять полезный эхо-сигнал и игнорировать остальные позволяет специальное программное обеспечение, установленное на сервисном компьютере или встроенное в уровнемер. Главная проблема заключается в том, что каждому эхо-сигналу в частотном спектре соответствует не одиночная частота, а интервал частот, ограниченный некоторой огибающей. Это вносит дополнительную погрешность в определение расстояния.

В радарных уровнемерах применяются СВЧ-сигналы с несущей частотой, лежащей в диапазоне от 5,8 до 37,5 ГГц. К сожалению, не существует какой-то одной оптимальной частоты для всех возможных случаев применения радарных систем контроля уровня: любое преимущество в одном случае может оказаться существенным недостатком в другом. Для высокочастотных уровнемеров ситуация осложняется тем, что из-за более короткой длины волны излучения паразитные эхо-сигналы будут формироваться от более мелких объектов, которые для низкочастотных уровнемеров могут быть незаметны.

Определенным недостатком использования радиоизлучения с частотой 37 ГГц является некоторая потеря мощности электромагнитного излучения при высокой концентрации пыли и влаги. При расстоянии до зондируемой поверхности более 10 м и концентрации пыли до 0,25 кг/м^3 потери мощности могут достигать 30…50%.

Поэтому, только учитывая особенности используемого метода, грамотно осуществляя выбор конфигурации уровнемера, скрупулезно прорабатывая способ и место монтажа, а затем так же скрупулезно его осуществляя и, наконец, тщательно выполняя настройку всей системы, можно получить ожидаемый результат.

Таким образом, применение радарной техники для определения профиля засыпи шихты доменной печи прежде требует решения комплекса

технических и программно-алгоритмических задач, исходя из следующих особенностей доменного процесса:

- высокой температуры доменных газов и поверхности колошника;
- значительной запыленности рабочего пространства печи;
- динамического состояния поверхности материалов;
- насыщенности рабочего пространства печи металлоконструкциями и движущимися механизмами, порождающими помехи при зондировании шихты.

С учетом конструктивных особенностей и габаритных размеров доменных печей, а также расположения оборудования загрузочных устройств определение профиля засыпи шихты на колошнике должно обеспечиваться многопозиционным (веерным) зондированием поверхности засыпи шихты, которое реализуется несколькими радарами, объединенными в блоки радиолокационного наблюдения.

Применение расчетно-экспериментальной методики в сочетании с обширными данными о расположении материалов в печи при их загрузке существенно расширит возможности и увеличит точность расчетов, обеспечит оперативное решение широкого круга задач управления распределением шихтовых материалов и газового потока в доменных печах.

Технология и оборудование современной доменной печи настолько сложны и многогранны, что управлять ее ходом с учетом информации о работе многочисленных подсистем и об изменении технологических параметров без АСУ ТП затруднительно. На крупных доменных печах все шире применяются АСУ комплексом механизмов системы загрузки, основанные на применении современных вычислительных средств.

Система загрузки современной доменной печи должна обеспечивать загрузку кокса, агломерата (нередко нескольких видов), окатышей и двух-трех разновидностей добавок. Из приемных бункеров шихтовые материалы подают на грохоты для отсева мелочи, и далее в весовые воронки. Расход материала, подаваемого на грохот, может регулироваться с помощью регулируемых затворов или питателей, управляющих толщиной слоя материала и качеством отсева мелких частиц.

Загрузка в печь шихтовых материалов различного фракционного состава приводит к неравномерному распределению пустот по концентрическим сечениям столба шихты, так как мелочь заполняет пустоты между крупными кусками.

В современных доменных печах непрерывная шихтоподача осуществляется в течение длительного времени. Однако практика показывает, что для обеспечения нормального хода доменной печи необходимо оперативное применение отсева мелких фракций шихты. Причем, при торможении хода доменной печи требуется увеличение эффективности отсева мелких фракций, что способствует развитию доменной плавки.

 ISSN 1991-7848

Принципиально новым шагом в данном направлении будет разработка способа дозирования материала шихты для доменной печи. Данный способ позволит совершенствовать доменный процесс и предназначается для изменения эффективности грохочения шихтовых материалов в зависимости от хода доменной печи.

Наиболее близким является способ дозирования материала шихты для доменной печи, включающий подачу этого материала из приемного бункера с заслонкой на грохот, грохочение, транспорти-рование материала по грохоту и последующую его загрузку за постоянное время набора дозы материала в весовой бункер.

Способ реализуется по сигналу о необходимости набора заданной дозы в весовой бункер. При этом включается привод грохота, и материал из приемного бункера поступает на грохот слоем, высота которого устанавливается ограничительной заслонкой для дози-рования за постоянное время (определяется работой печи в режиме «догонка меры»). В процессе прохождения материала по грохоту часть мелкой фракции материала отсеивается, а другая поступает в весовой бункер. В весовом бункере текущая величина материала с помощью силоизмерительных датчиков взвешивается и сравнивается в дальнейшем с заданным значением массы, установленным датчиком дозы. При достижении равенства заданной и поступившей в весовой бункер массы материала для доменной печи прекращается.

Недостатком этого способа дозирования материала для доменной печи является то, что он не позволяет осуществить загрузку материала в весовой бункер одновременно с качественным отсевом мелкой фракции по мере опускания материала в доменной печи, изменения гранулометрического состава материала, влажности и других факторов его физико-химического состояния.

Задачей является изменение эффективности отсева мелкой фракции путем оперативной подачи материала на грохот в зависимости от опускания материала в доменной печи, которое целесообразно будет определять методами радарной техники. Способ дозирования материала для доменной печи включает подачу материала шихты из приемного бункера с заслонкой на грохот, грохочение, транспортирование материала по грохоту и, до набора дозы, изменение загрузки материала в весовой бункер на разницу времен прогнозируемого окончания дозирования и прогнозированного достижения заданного уровня материала по мере его опускания в доменной до момента равенства этих времен нулевому значению.

В результате данный способ позволяет реализовать автоматическую корректировку наличия мелкой фракции материала в дозе шихты в зависимости от изменения работы доменной печи: с ухудшением работы доменной печи уменьшается количество мелкой фракции материала.

Дальнейшие исследования в данном направлении и последующая доработка рассмотренного способа дозирования материала шихты позволят

оперативно изменять эффективность грохочения материала в процессе его дозирования в весовой бункер с учетом хода доменной печи и, таким образом, осуществить возможность широкого применения данного способа в промышленных условиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Научное обоснование и применение микроволновой техники для информационного обеспечения АСУ ТП в металлургии / В.И. Головко // Автореферат диссертации на соискание степени доктора технических наук. – Днепропетровск, 2003. – 40 с.
2. Смоляк В.А., Щербицкий Б.В. Автоматизация и оптимизация процесса доменной плавки. – М.: Металлургия, 1974. – 153 с.
3. Серов Ю.В. Метрологическое обеспечение технологических процессов черной металлургии (метрология и информатика): Справ. изд. в 2 кн. Кн. 1, 2. – М.: Металлургия, 1993. – 624 с.
4. Гольдин М.Л., Тамаров И.С. Радиоизотопный контроль газопроницаемости кокса. – М.: Атомиздат, 1974. – 94 с.
5. 5. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий: Справочник в 2 кн. / Под. ред. В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, 1986. – Кн. 1. – 488 с.
6. Микроволновые методы контроля технологических параметров // О.Н. Кукушкин, В.И. Головко, Н.В. Михайловский и др. / Современные проблемы металлургии. Научные труды ГМетАу. – Вып. 1. – Днепропетровск. 1999. – С. 279-296.

 ISSN 1991-7848

УДК 622.785

Д.А.Ковалев, А.В.Бабенко, Н.Д.Ванюкова, М.В.Ягольник

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРОЦЕССОВ АКТИВАЦИИ ТВЕРДОФАЗОВЫХ РЕАКЦИЙ НА КАЧЕСТВО ПРОДУКТА И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ПРИ ОКУСКОВАНИИ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ ОФЛЮСОВАННЫХ ШИХТ

Виконано аналіз спікання агломерату з урахуванням інтенсифікації твердофазних реакцій між компонентами шихти і їхній зв'язок з утворенням розплаву і формуванням структури окускованого продукту. Проведена серія експериментів на дериватографі Q-1500D для визначення характеру основних реакцій у твердих фазах та реакційної здатності компонентів агломераційної шихти. Основою роботи є активація колошникового пилу шляхом спільного здрібнювання з вапняком. Дослідження виконане з використанням методу математичного планування експерименту Боксу - Бенкіна (трьохфакторний експеримент).

Проведен анализ спекания агломерата с учетом интенсификации твердофазных реакций между компонентами шихты и их связь с образованием расплава и формированием структуры окускованного продукта. Проведена серия экспериментов на дериватографе Q-1500D для определения характера основных реакций в твердых фазах и реакционной способности компонентов шихты агломерации. Основой работы является активация колошниковой пыли путем общего измельчения с известняком. Исследование выполнено с использованием метода математического планирования эксперимента Бокса - Бенкина (трехфакторный эксперимент).

The analysis of agglomeration is executed taking into account intensification of reactions in solid phases between the components of charge. The series of experiments are conducted on derivatograf Q-1500D for determination of character of flowing of basic reactions in solid phases and reactionary ability of components of charge. Activation of BF dust is basis of work by its joint growing shallow with a limestone. Research is executed with the use of the mathematical planning method of Box - Benkin experiment (three-factor experiment).

Введение

Существенное снижение расхода кокса на выплавку чугуна в современных условиях доменной плавки, обусловленное применением высоконагретого комбинированного дутья (природный газ с кислородом), невозможно без коренного улучшения качества железорудного сырья, характеризующегося повышением содержания железа в концентратах, увеличением прочности агломерата и окатышей, улучшением физико-химических свойств, снижением колеблемости физических и химических характеристик.

Это необходимо для сохранения эффективности производства агломерата в условиях осуществления наметившихся тенденций по механической обработке спека и для существенного улучшения показателей доменной плавки. Утилизация отходов металлургического производства в

© КОВАЛЕВ Д.А., БАБЕНКО А.В., ВАНЮКОВА Н.Д., ЯГОЛЬНИК М.В., 2006

составе агломерационной шихты уменьшает производительность агломашин и ухудшает качество агломерата.

Постановка задачи. Колошниковая пыль и дисперсные шламы, выдуваемые из доменной печи, обладают крайне низкой активностью и представляют собой возврат агломерата, обладающий высокой температурой размягчения, что повышает температуру образования расплава в процессе агломерации [1]. Целью данной работы является активация колошниковой пыли путем совместного измельчения её с известняком.

В работах [1,2] показано, что активация железорудных материалов: руды, возврата, отсевов агломерата и окатышей при их совместном измельчении с известняком способствует улучшению качества агломерата и окатышей при увеличении производительности. Существенным является то, что улучшение показателей наблюдается при определённом соотношении гематита и оксида кальция в ферритной смеси. Доказана возможность замены оксида кальция кальцитом. Влияние содержания углерода в колошниковой пыли, а также совместно измельченных смесей на процесс агломерации и качество агломерата, является предметом исследования.

Методика исследования. В исследовании использовали шихтовые материалы, химический состав которых приведён в таблице 1.

Таблица 1

Химический состав исходных материалов

МАТЕРИАЛ	$Fe_{об.}$	FeO	Fe_2O_3	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	П.П.П.
Железорудный концентрат	63,84	27,4	60,92	9,01	1,03	0,34	0,65	0,65
Железная руда	54,4	-	79,10	18,0	0,4	0,8	1,2	0,20
Колошниковая пыль	45,09	12,24	50,82	9,68	13,09	2,28	3,23	0,82
Известняк	0,28	-	0,40	1,34	53,22	0,92	0,56	43,56
Известь (ч.д.а.)	-	-	-	-	99,9	-	-	-
Кальцит (ч.д.а.)	-	-	-	-	55,9	-	-	44,0

*Коксик A = 15,5 % V = 2,8 % S = 3,0 %

* Ферритная смесь задавалась в шихту в соответствии с планом эксперимента.

Подготовка ферритной смеси. Ферритную смесь получали совместным измельчением колошниковой пыли с известняком. Измельчение производили в мельнице Ш 0,20м, L=0,35м, заполненной стальными шарами. Число оборотов мельницы - 50об/мин; время совместного измельчения выбиралось с учётом развития активационных процессов и составляло ~ 4 мин.

 ISSN 1991-7848

Ферритную смесь для дифференциально-термического анализа получали из CaO(ч.д.а.); $CaCO_3$(ч.д.а.) и Fe_2O_3(ч.д.а.), исходя из весовых частей (соотношений) на получение однокальциевого феррита, а также при соотношениях CaO : Fe_2O_3 (1:2; 2:1, 1:1). Эти смеси получали простым смешиванием, а для исследования процессов на дериватографе активацию производили растиранием смеси в агатовой ступке.

Смешивание шихтовых материалов производили путем послойной укладки материалов на поддон с последующим перемешиванием слоев между собой до полной гомогенизации шихты

Окомкование шихты осуществлено на диске Ш 0,5м с бортом. Шихта послойно (шихта/вода/шихта) укладывалась на диск с последующим смешиванием слоев и дополнительным увлажнением ($m_{воды}$≈200г). Шихту окомковывали путём вращения материала по внутренней поверхности диска. Влажность шихты поддерживали в пределах 8,75 – 9,25%.

Загрузка. Загрузку окомкованной шихты в агломерационную чашу была производили вручную. При загрузке соблюдалась равномерность и однородность укладки материала. Слой шихты высотой 250мм укладывался на постель из возврата крупностью 8-10мм массой 250г. Масса шихты составляла ~2,650-3,120 кг.

Описание агломерационной установки Установка оборудована зажигательным горном с концентрационной чашей и нагнетающим электровентилятором для поддержания температуры зажигания 1150-1225°C. Агломерационная чаша с целью снижения теплопотерь заключена в термоизоляционный кожух и футерована шамотом. Температуру зажигания шихты и температуру отходящих газов, по которой определяли окончание процесса спекания, контролировали с помощью термопар. Газодинамические параметры процесса контролировали изменением разрежения под колосниковой решёткой. Положение задвижки на газоходе к эксгаустеру не изменяли на протяжении всех опытов.

Испытания на прочность. Для испытаний отбирали пробу агломерата массой 1 кг фракции +10 мм. Пробу помещали в барабан Ш 20мм с двумя полками. Барабан вращался со скоростью 50 об/мин в течение 4 мин. Пробу рассеивали на фракции +5 мм (индекс на удар); -0.5 мм (индекс на истирание); 0.5-5 мм (степень разрушения)

Дифференциально - термический анализ выполнен на дериватографе Q -1500D (нагрев до 1000°C, скорость нагрева 10°C/мин). Исследовали следующие смеси Fe_2O_3+CaO (1:1;1:2;2:1) и смеси, полученные совместным измельчением колошниковой пыли и известняка [КП+И-к] (1:1; 1:2; 2:1).

Дериватограммы экспериментов приведены на рисунке 6.

Спекания агломерационных шихт выполнили в соответствии с трёхфакторным планом эксперимента Бокса-Бенкина (центральное композиционное ортогональное планирование второго порядка для трехфакторного эксперимента). В качестве факторов были выбраны:

содержание возврата – X_1; содержание твёрдого топлива – X_2; содержание ферритной смеси – X_3.

Был выбран интервал варьирования факторов и определены величины уровней факторов (интервал варьирования равен 10 – 25% максимального значения фактора) для приведения к условиям стандартной матрицы:

Таблица 2

Натуральные значения факторов для уровней

	X_1, %	X_2, %	X_3, %
Уровень верхний	35	6	10
нулевой	30	4	5
нижний	25	2	0
Интервал варьирования	5	2	5

Все тринадцать опытов были выполнены с обеспечением рандомизации. Опыты, в которых параметры оптимизации (в данном случае – удельная производительность) имеют максимальное, минимальное значение и для нулевой точки были повторены дважды.

Результаты исследования. На основе экспериментальных результатов, определенных в соответствии с планом экспериментов, были получены математические модели для определения удельной производительности, индексов на удар и на истирание. Были проверены адекватности полиномов экспериментальным данным.

$$УП = 0,933+0,05463(x_1-30)/5-0,011625(x_2-4)/2-0,1687(x_3-5)/5 + +0,03275(x_1-30)/5*(x_2-4)/2+0,03550(x_1-30)/5*(x_3-5)/5-0,10300(x_2-4)/2*(x_3-5)/5- -0,10038[(x_1-30)/5]^2-0,11986[(x_2-4)/2]^2-0,27163[(x_3-5)/5]^2$$

$$ИнУ= 92+0,625*(x_1-30)/5+1,813*(x_2-4)/2-0,438*(x_3-5)/5 - -2,5*(x_1-30)/5*(x_2-4)/2-0,75*(x_1-30)/5*(x_3-5)/5-4,625*(x_2-4)/2*(x_3-5)/5 - -1,1875*[(x_1-30)/5]^2-1,8125*[(x_2-4)/2]^2-3,0625*[(x_3-5)/5]^2$$

$$ИнИ = 2+0,125*(x_1-30)/5-0,0625*(x_2-4)/2+1,0625*(x_3-5)/5 + +0,25*(x_1-30)/5*(x_2-4)/2+0,75*(x_1-30)/5*(x_3-5)/5+1,125*(x_2-4)/2*(x_3-5)/5 + +0,1875*[(x_1-30)/5]^2+0,5625*[(x_2-4)/2]^2+2,0625*[(x_3-5)/5]^2$$

Таблица 3

Расчетный состав агломерационных шихт и экспериментальные данные по результатам их спекания

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Концентрат,кг	1,95	1,95	1,95	1,95	1,95	1,95	1,95	1,95	1,95	1,95	1,95	1,95	1,95
Известняк,кг	0,15	0,15	0,15	0,15	---	0,30	---	0,30	---	0,30	---	0,30	0,15
Руда,кг	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Коксик,кг	0,20	0,10	0,20	0,10	0,13	0,13	0,13	0,13	020	0,20	0,10	0,10	0,15

 ISSN 1991-7848

Колошниковая пыль,кг	0,15	0,15	0,15	0,15	---	0,30	---	0,30	---	0,30	----	0,30	0,15
Возврат,кг	1,49	1,49	1,0	1,06	1,49	1,49	1,06	1,06	1,27	1,27	1,27	1,27	1,27
Смесь (КП+Известняк)	0,30	0,30	0,30	0,30	0,60	---	0,60	---	0,60	---	0,60	----	0,30
Вес влажной шихты, кг	5,20	5,13	4,67	4,60	5,14	4,96	4,34	430	473	4,44	4,67	4,82	4,82
Продолжительность спекания, мин.	16,5	12,5	32,0	14,0	26,0	19,0	40,0	14,0	25,0	12,5	37,0	22,0	15,0
Усадка, мм	15,0	37,0	32,0	56,0	22,0	55,0	35,0	30,0	45,0	40,0	35,0	45,0	40,0
Вес загруженной шихты, кг	2,72	2,74	2,80	2,55	2,71	2,73	2,79	2,73	2,65	2,72	2,89	2,70	3,12
Вес пирога агломерата, кг	2,49	2,52	2,45	2,35	2,64	2,52	2,50	2,45	2,36	2,43	2,66	2,49	2,81
Вес фракции +8, кг	1,72	1,85	1,85	1,73	1,69	1,95	1,65	1,66	1,64	2,03	1,78	1,55	2,19
Вес фракции+10, кг	1,33	1,40	1,55	1,35	1,25	1,60	1,25	1,29	1,24	1,77	1,39	1,14	1,85

Таблица 4

Изменение влажности шихты, окатышей и количества добавляемой влаги при окомковании шихт с ферритной смесью

№ П/П	Параметры	Без ферритной смеси			С влажной ферритной смесью			С сухой ферритной смесью		
		бентонит, %			бентонит, %			бентонит, %		
		1	0,8	0,5	1	0,8	0,5	1	0,8	0,5
1	Влажность концентрата,%	10,7	10,53	10,51	10,5	10,5	10,5	10,55	10,5	10,5
2	Влажность шихты,%	9,46	10,3	10,31	10,29	10,33	10,30	9,5	9,50	9,55
3	Количество добавляемой влаги, л	2,3	1,66	1,20	0,78	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
4	Влажность окатышей, %	10,3	9,59	9,62	9,75	9,69	9,68	9,70	9,70	9,60
5	Средний размер гранул, мм	11,3	10,4	10,0	10,1	10,2	10,5	13,5	13,2	13,2
6	Прочность гранул, кг/ок.	1,15	1,1	1,06	1,36	1,12	1,17	1,40	1,40	1,40

Таблица 5

Показатели производительности и качества агломерата

	Удельная производительность	Индекс на удар (+5 мм)		Разрушаемость (0,5 – 5 мм)		Индекс на истирание (-0,5 мм)	
Номер опыта	т/м^{2}час	г	%	г	%	г	%
1	0,682	900	90	80	8	20	2
2	0,978	900	90	75	7,5	25	2,5
3	0,382	930	93	45	4,5	25	2,5
4	0,809	830	83	130	13	40	4

5	0,422	870	87	70	7	60	6
6	0,684	890	89	70	7	40	4
7	0,367	880	88	90	9	30	3
8	0,771	870	87	90	9	40	4
9	0,425	830	83	90	9	80	8
10	0,973	935	93,5	45	4,5	20	2
11	0,316	900	90	50	5	50	5
12	0,452	820	82	145	14,5	35	3,5
13	0,933	920	92	60	6	20	2

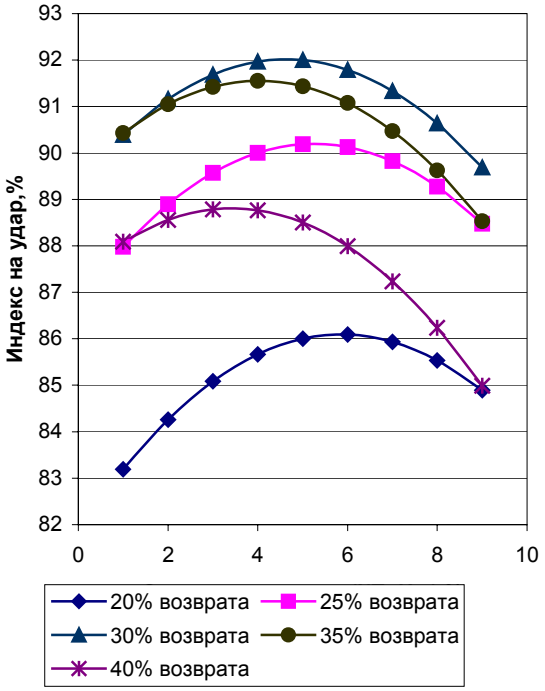


Рисунок 1 - Зависимость ИнУ от содержания ферритной смеси

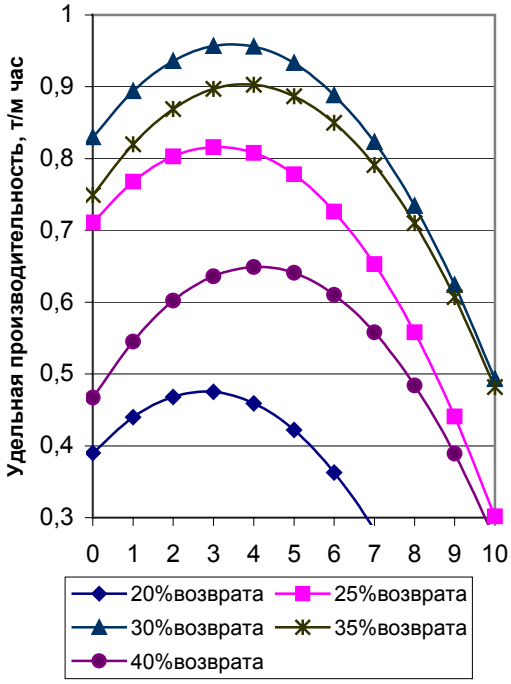


Рисунок 2 - Зависимость УП от содержания ферритной смеси

Шихтовые материалы, используемые для производства агломерата, содержат различные дефекты, которые определяют их химическую активность и физические свойства. Эти структурные дефекты образуются в процессе роста кристаллов или при дроблении (измельчении) для получения заданного минералогического состава шихтовых материалов. Реальные материалы с дефектами имеют больший запас энергии в сравнении с идеальными кристаллическими веществами и, следовательно, обладают большей реакционной способностью. Различие в количестве структурных дефектов определяет параметры процесса агломерации и качество агломерата. С термодинамической точки зрения, изменение величины поверхности зерен в результате измельчения осуществляется за счет увеличения расхода энергии, которая затем реализуется в процессе агломерации.

 ISSN 1991-7848

Дефекты кристаллической решетки, являющиеся результатом измельчения, вызывают движение атомов к более стабильным позициям с соответствующим уровнем энергии.

В процессе агломерации стабильная структура спека создается благодаря внешним и внутренним источникам теплоты, определяющим формирование связок между зернами и степень кристаллизации агломерата. В данном случае под процессом агломерации подразумевается последовательная смена переходных состояний от начала упрочнения спека до его охлаждения. Важную роль в процессе упрочнения спека играют реакции в твердых фазах, продукты которых определяют развитие жидкофазного спекания, конечный минералогический состав агломерата и его металлургические свойства. Анализ вероятных твердофазовых соединений показывает, что они образуются в результате реакций между железосодержащими оксидами и пустой породой спекаемых материалов. Число контактов между этими оксидами, является наиболее существенным фактором, определяющим выход продукта в результате реакций в твердой фазе. Наиболее важными компонентами, участвующими в формировании структуры агломерата являются: CaO, MgO, SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3, Fe_3O_4, MnO и минералы, образующиеся на базе этих компонентов.

Реакции в твердых фазах при агломерации происходят в зоне подогрева шихты. Благодаря быстрому подъему температуры в этой зоне продолжительность твердофазного взаимодействия малая. Количество твердофазного продукта определяется площадью контакта этих компонентов (рисунок 3). Химическое сродство реагирующих веществ в данном случае является необходимым условием. Так, например, при спекании гематитовых руд фаялит может быть получен только в восстановительной атмосфере после восстановления гематита, поскольку гематит в окислительной атмосфере не реагирует с кремнеземом.

Термодинамический подход имеет особое значение в сложных системах при агломерации, когда интенсификация процесса и качество агломерата зависят от первичного твердофазного соединения с низкой температурой плавления, обеспечивающего переход в жидкофазное спекание.

Из ряда процессов, которые могут протекать в системе, термодинамически наиболее вероятным является тот, который сопровождается наибольшей убылью термодинамического потенциала.

Уменьшение термодинамического потенциала ΔZ выражает максимальную работу процесса при постоянном давлении и характеризует «химическое сродство» между веществами.

Из всего многообразия реакций в сложной системе аглошихты, рассмотрим реакции образования силикатов кальция, ферритов кальция, силикатов железа и железокальциевых оливинов. Некоторые из них в достаточной степени освещены в литературе, в частности, реакции

образования силикатов кальция [4]. А данные для образования ферритов кальция и железокальциевых оливинов отсутствуют.

Расчет термодинамического потенциала производили по трехчленной формуле (второе приближение Улиха)[5]:

$$\Delta Z_T = \Delta H^0_{298} - T\cdot\Delta S^0_{298} - a\cdot T\cdot г(T),$$

где $г(T) = \ln(T/298) + (298/T) - 1$.

Для расчета использовали термохимические данные, приведенные в справочнике [6].

Получены следующие уравнения в интервале температур 273К – 1400К соответственно:

$$\Delta Z^0_T = [-215.476\cdot10^3 - 15.48\cdot T - 19.664\cdot T\cdot г(T)] \quad (5.1);$$

$$\Delta Z^0_T = [-30.961\cdot10^3 - 17.15\cdot T - 60.754\cdot T\cdot г(T)] \quad (5.5);$$

$$\Delta Z^0_T = [-297.064\cdot10^3 - 175.97\cdot T - 1.129\cdot T\cdot г(T)] \quad (4.1);$$

$$\Delta Z^0_T = [+320.494\cdot10^3 - 340.24\cdot T - 23.263\cdot T\cdot г(T)] \quad (4.6);$$

$$\Delta Z^0_T = [+12.782\cdot10^3 - 15.85\cdot T - 1.673\cdot T\cdot г(T)] \quad (5.10);$$

$$\Delta Z^0_T = [+18.338\cdot10^3 - 23.63\cdot T - 2.426\cdot T\cdot г(T)] \quad (5.9);$$

$$\Delta Z^0_T = [-29.652\cdot10^3 - 30.12\cdot T - 6.945\cdot T\cdot г(T)] \quad (5.7).$$

После расчетной проверки различных реакций установлена возможность протекания реакций, приведенных в таблице.

Результаты расчета по приведенным формулам представлены на рисунках 4 и 5.

Из рассмотренных реакций, которые могут протекать в смеси шихтовых материалов, наиболее вероятной является реакция образования однокальциевого феррита и двухкальциевого силиката. Образование в твердой фазе железокальциевых оливинов и фаялита маловероятно.

Таблица 6

Пояснения к рисункам 4 и 5

Номер	Реакция	
	Рисунок 4	Рисунок 5
1	$CaCO_3+Fe_2O_3=CaO\cdot Fe_2O_3+CO_2$	$CaO+Fe_2O_3=CaO\cdot Fe_2O_3$
2	$3CaCO_3+2SiO_2=3CaO\cdot 2SiO_2+3CO_2$	$3CaO+2SiO_2=3CaO\cdot 2SiO_2$
3	$2CaCO_3+SiO_2=2CaO\cdot SiO_2+2CO_2$	$2CaO+2SiO_2=2CaO\cdot SiO_2$
4	$3CaCO_3+SiO_2=3CaO\cdot SiO_2+3CO_2$	$3CaO+SiO_2=3CaO\cdot SiO_2$
5	$CaCO_3+SiO_2=CaO\cdot SiO_2+CO_2$	$2CaO+Fe_2O_3=2CaO\cdot Fe_2O_3$
6	$2CaCO_3+Fe_2O_3=2CaO\cdot Fe_2O_3+2CO_2$	$CaO+SiO_2=CaO\cdot SiO_2$
7	$SFe_3O_4+SCO+SiO_2+SCaCO_3=$ $=CaO_{0.5}\cdot FeO_{1.5}\cdot SiO_2+CO_2$	$\frac{2}{3}Fe_3O_4+SiO_2+CO=2FeO\cdot SiO_2+\frac{2}{3}CO_2$
8	$\frac{1}{3}Fe_3O_4+\frac{1}{3}CO+SiO_2+CaCO_3=$ $=CaO\cdot FeO\cdot SiO_2+1\frac{1}{3}CO_2$	$2FeO+SiO_2=2FeO\cdot SiO_2$
9		$SFe_3O_4+SCO+SiO_2+SCaO=$ $=CaO\cdot FeO\cdot SiO_2+SCO_2$
10		$\frac{1}{3}Fe_3O_4+\frac{1}{3}CO+SiO_2+CaO=$ $=CaO\cdot FeO\cdot SiO_2+\frac{1}{3}CO_2$

 ISSN 1991-7848

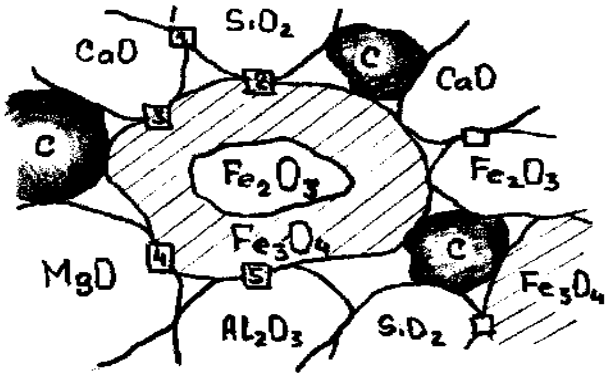


Рисунок 3 - Схема контактов между оксидами агломерационной шихты

1-Ca_2SiO_4; 2-Fe_2SiO_2; 3-$CaFe_2O_4$; 4-$Mg_xFe_{3-x}O_4$; 5-$FeAlO_3$

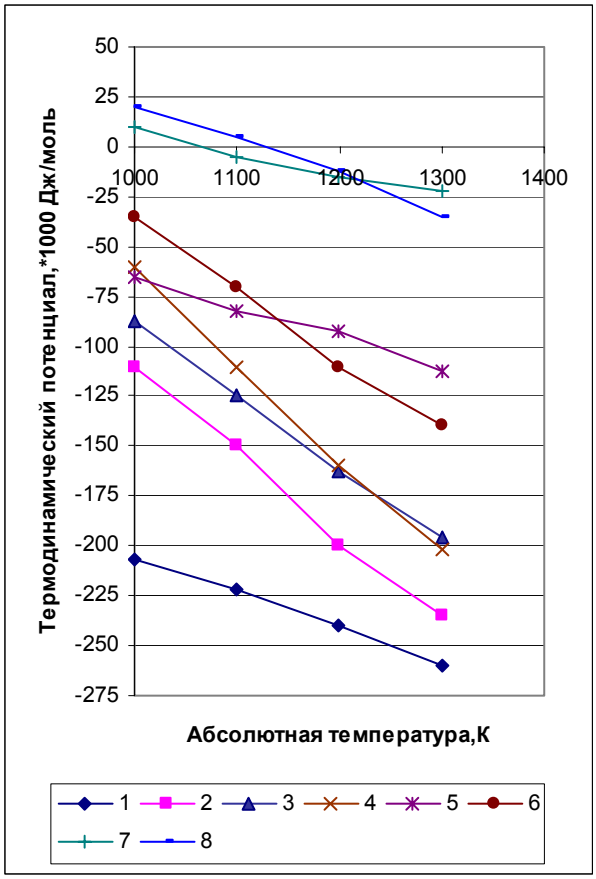


Рисунок 4

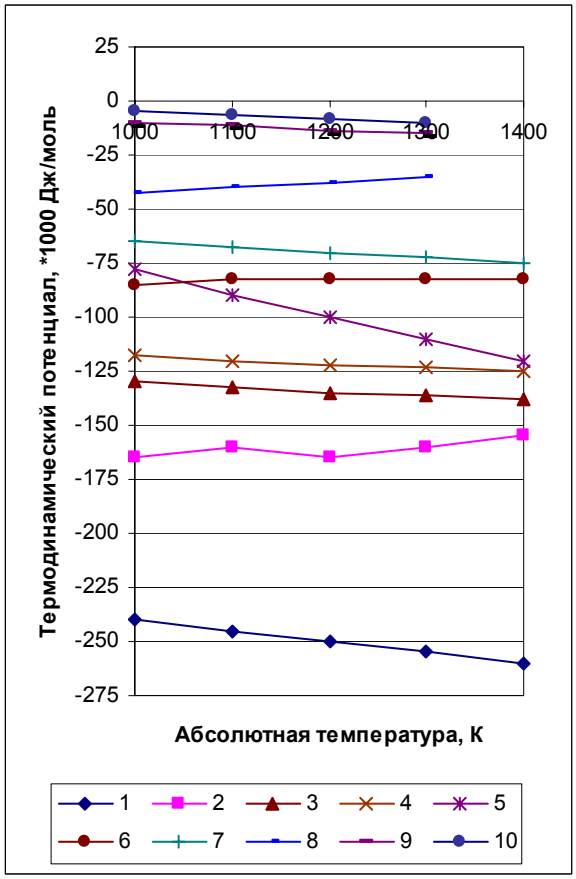


Рисунок 5

Зависимость термодинамических потенциалов некоторых реакций от температуры.

Благодаря большему числу контактов между CaO и Fe_2O_3 ферриты кальция на стадии твердофазного спекания появляются в значительно больших количествах по сравнению с силикатами кальция. Установлено, что скорость образования ферритов кальция в твердой фазе чрезвычайно большая. При 1200°С в смеси порошков извести и гематита 74% извести переходит в феррит кальция за одну минуту.

Для интенсификации процесса ферритообразования в твердой фазе предложено из гематитсодержащих и известь содержащих компонентов шихты готовить ферритную смесь путем их совместного дробления или измельчения [3]. Среди компонентов агломерационной шихты гематитсодержащими материалами являются: гематитовая руда, частично окисленный возврат, колошниковая пыль, шламы. Последние были подвергнуты спеканию, и их поверхность потеряла активность. Для оценки характера протекания физико-химических процессов в смесях твердых веществ: колошниковая пыль - известняк; гематит (Ч.Д.А.) – известь; гематит (Ч.Д.А.) -кальций, были использованы методы термогравиметрического и дифференциально-термического анализа.

Как известно, реакции между твердыми фазами являются экзотермическими, но в данном случае на значение теплосодержания системы, наряду с образованием ферритов, большое значение оказывают реакции разложения карбонатов и прямого восстановления оксидов железа.

В интервале температур (400-500°С) наблюдается значительное снижение массы образцов, что связано в первую очередь с началом реакции ферритообразования и удалением CO_2:

$$CaCO_3+Fe_2O_3=CaO\cdot Fe_2O_3+CO_2$$

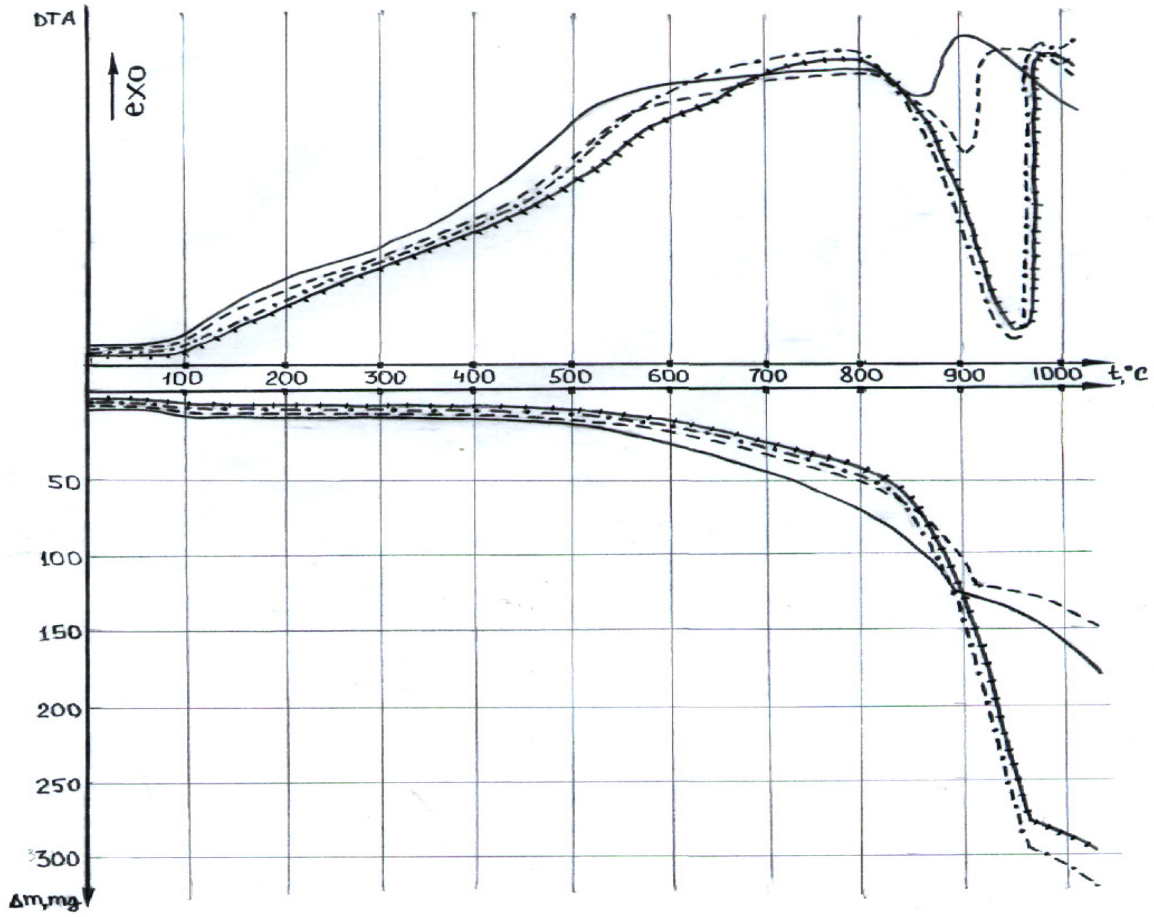
Исходя из кривых ДТА на рисунке 6, видно, что начало реакции ферритообразования в образцах, прошедших активацию, наблюдается при более низких температурах, а сами реакции протекают в более полном объеме.

При 800°С наблюдается резкое снижение массы образцов и значительное развитие эндотермических реакций. Эффект определяется суммарным влиянием реакций разложения карбонатов кальция и прямого восстановления оксидов железа.

В образце с измельченной колошниковой пылью наблюдается меньшее развитие реакций разложения карбоната, что связно с тем, что активированные и находящиеся в более тесном контакте с частицами гематита карбонаты в большей степени успели прореагировать с гематитом, чем неактивированные. Об этом также свидетельствует и более высокая массопотеря измельченной колошниковой пыли к 800°С.

Так потеря массы равная 500 мг для совместно измельченной смеси достигается при температуре 700°С, а для неизмельченной смеси и только колошниковой пыли – в интервале температур 800-830°С. Это свидетельствует об интенсификации твердофазовых реакций при подготовке исходных материалов совместным измельчением. Результатом этого процесса является увеличение поверхности контакта реагирующих веществ и их активация, благодаря увеличению дефектности исходных структур при измельчении.

 ISSN 1991-7848



Смесь (КП+И-к) (измельченная)

Смесь (КП+И-к)

Колошниковая пыль (измельченная)

Колошниковая пыль

Рисунок 6 - Дифференциально-термический анализ

Выводы

1. Выполнен анализ спекания агломерата с учётом интенсификации твердофазных реакций между компонентами шихты и их связь с образованием расплава и формированием структуры окускованного продукта. Показано, что необходимые свойства расплава можно получить подбором соответствующих соотношений компонентов шихтовых материалов, либо добавлением в шихту смесей, способных увеличивать пропитку шихты. Определены компоненты шихты, обладающие минимальным запасом свободной энергии. К ним относится колошниковая пыль.

2. На основании экспериментальных данных разработаны математические модели для расчёта удельной производительности, индеса на удар и индекса на истирание при изменении расхода возврата, расхода твёрдого топлива и расхода смеси (КП+И-к). Анализ процесса с использованием математической модели показал, что оптимальное количество ферритной смеси изменяется в интервале от 3 до 6%, причём уменьшение количества возврата в шихте до 20% соответствует нижнему пределу расхода смеси. Установлены оптимальные расходы: твёрдого топлива – 3,5-6% , возврата – 20-35%
3. Серия экспериментов, проведенная на дериватографе Q-1500D, показала, что измельчение колошниковой пыли положительно сказывается на её реакционных способностях. Так, все физико-химические процессы, протекающие при равномерном нагреве измельченной колошниковой пыли, начинаются на 25-35°С раньше, чем при нагреве исходной (неактивированной) колошниковой пыли. Положительное влияние активации колошниковой пыли также проявляется при «нагреве» ферритных смесей. При совместном измельчении колошниковой пыли и известняка температура начала образования однокальциевого феррита снижается на 10-20°С.

ЛИТЕРАТУРА

1. Роль возврата при образовании жидкой фазы в процессе агломерации // Г.Г. Ефименко, А.И. Каракаш, Д.А. Ковалев // Известия ВУЗов, Черная металлургия, - 1969. - №6. – с. 54-57.
2. Разработка технологии агломерации с ферритными смесями / Д.А. Ковалёв, С.В. Титов, Е.З. Пономарёв // Металлургия и коксохимия. – Киев, 1983. – Вып.79. – с.45-47.
3. Применение смеси известняка с возвратом для повышения прочности агломерата и производительности агломашины // Г.Г. Ефименко, А.И. Каракаш, Д.А. Ковалев // Металлургия и коксохимия. – Киев. -1971. – Вып.14. – с. 3-6.
4. Будников П.П., Гистлинг А.М.- Реакции в смесях твердых веществ. – М.: Стройиздат. – 1971.- 487с.
5. Крестовников А.Н., Вигдорович В.Н. – Химическая термодинамика. – М.: Металлургиздат. – 1961. - 220с.
6. Верятин У.Д., Маширев В.П. – Термодинамические свойства неорганических веществ. – М.: Изд-во Н.Л. – 1965. – 525с.

 ISSN 1991-7848

В.Д. Шалимов, А.В. Кекух, В.А. Поляков, А.П. Стовпченко

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РАЗВИТИЯ ПРОИЗВОДСТВА И РЫНКА ЛЕГИРОВАННОЙ КАТАНКИ НА УКРАИНЕ

Наведені результати досліджень, які виконані в ході організації широкого промислового виробництва катанки з складнолегованих низькосірчастих сталей, які місять молібден, нікель і цирконій, в умовах конвертерного цеху комбінату «Криворіжсталь». Обгрунтовані ефективні організаційно-економічні рішення, які дозволили в короткий термін освоїти раціональні технології виплавки легованих зварювальних сталей і прокатки катанки, призначеної для виготовлення зварювальних матеріалів для зварювання особливо відповідальних конструкцій.

Приведены результаты исследований, выполненных в ходе организации широкого промышленного производства катанки из сложнолегированных низкосернистых молибден, никель и цирконий содержащих сталей в условиях конвертерного цеха комбината «Криворожсталь». Обоснованы эффективные организационно-экономические решения позволившие в короткий срок освоить рациональные технологии выплавки легированных сварочных сталей и прокатки катанки, предназначенной для изготовления сварочных материалов для сварки особо ответственных конструкций.

Researches results at organization of wide commercial output of rod wire from complex alloyed (by molybdenum, nickel and zirconium) low sulfur steels in the conditions of converter workshop of the “Krivorozstahl” metallurgical work were described. Effective management-economic decisions allowing in short while to master the rational technologies of the alloyed welding steels melting and of rolling the rod wire which is intended for manufacture of welding materials for of especially responsible constructions welding were grounded.

Введение

Основными задачами черной металлургии в целом на современном этапе являются ресурсосбережение, повышение качества металлопродукции и разработка, освоение новых марок стали и технологий их производства, позволяющих экономить легирующие материалы, особенно, дорогостоящие импортируемые (никель, ферромолибден и др.). Помимо этого задачей динамично развивающегося предприятия является и расширение сортамента производимой продукции, увеличение объема производства и сбыта новой продукции, особенно, в направлении насыщения и развития внутреннего рынка.

В 90-х годах в Украине возникла острая необходимость в обеспечении трубной и судостроительной промышленности, машино- и мостостроения новыми видами металлопродукции, в частности, легированной сварочной проволокой из низкосернистых сталей композиций марганец-молибден, марганец-никель, марганец-молибден-никель, марганец-кремний-никель-титан и марганец-кремний-цирконий. Для снижения импортной зависимости отечественных трубных и других предприятий, выполнения

© ШАЛИМОВ В.Д., КЕКУХ А.В., ПОЛЯКОВ В.А., СТОВПЧЕНКО А.П., 2006

заказов государственного значения необходимо было наладить выпуск этих сталей в Украине.

Состояние проблемы

Обычно в мировой практике эти стали производят в электропечах с максимальной утилизацией легирующих элементов стратегической группы (никеля и молибдена) из легированных отходов и разливкой в слитки малой массы или на установках непрерывной разливки стали.

Используя накопленный опыт по производству катанки для сварочной проволоки из низкосернистых сталей марок Св-08Г2СЦ, Св-14Г2Сч, Св-08АА ученые Института черной металлургии НАН Украины, Института электросварки им. Е.О. Патона совместно со специалистами комбината «Криворожсталь» и ряда метизных предприятий Украины разработали, освоили и внедрили технологию производства катанки и сварочной проволоки из никель-молибденсодержащих сталей марок Св-08Г1НМА, Св-10НМА, Св-08ГСНТ, Св-08ГСМТ, Св-10ГН, Св-08ГМ, Св-08ХМ, Св-08Г2СЦ, Св-12ГСЦА (таблица 1).

Таблица 1

Химический состав сталей для легированных сварочных проволок

Марка стали	Массовая доля элементов, %											
	C	Mn	Si	S	P	Ni	Mo	Cr	Cu	Ti	Zr	Al
	не более или в пределах											
Св-08Г1НМА	0,09	1,0-1,5	0,20-0,45	0,015	0,020	0,50-0,70	0,60-0,85	0,30	0,25	-	-	0,05
Св-08ГМ	0,09	0,9-1,3	0,20-0,40	0,015	0,020	0,30	0,50-0,70	0,30	0,25	-	-	-
Св-08ХМ	0,05-0,10	0,35-0,60	0,12-0,40	0,025	0,020	0,30	0,50-0,70	0,85-1,25	0,25	-	-	-
Св-10ГН	0,12	0,90-1,20	0,15-0,35	0,025	0,030	0,90-1,20	-	0,20	0,25	-	-	-
Св-10НМА	0,07-0,12	0,40-0,70	0,12-0,35	0,025	0,020	1,00-1,50	0,40-0,55	0,20	0,25	-	-	-
Св-08ГСНТ	0,12	1,40-1,80	0,60-0,90	0,030	0,030	0,80-1,20	-	0,30	0,25	0,05-0,12	-	-
Св-08ГСМТ	0,06-0,11	1,00-1,30	0,40-0,70	0,025	0,030	0,30	0,20-0,40	0,30	0,25	0,05-0,12	-	-
Св-08Г2СЦ	0,05-0,12	1,60-2,10	0,70-1,00	0,025	0,030	0,25	-	0,20	0,25	-	0,10	-
Св-12ГСЦА	0,14	1,35-1,75	0,70-1,10	0,015	0,030	0,25	-	0,20	0,25	-	0,05-0,15	0,02-0,15

Эти сварочные проволоки широко используют при изготовлении газонефтепроводных труб высокого давления (Св-08Г1НМА, Св-08ГМ, Св-08ХМ), корпусов крупнотоннажных судов (Св-08ГСНТ, Св-08ГСМТ, Св-10ГН), сварных конструкций мостов (Св-10НМА) и других особо ответственных конструкций (Св-08Г2СЦ, Св-12ГСЦА).

Организация широкого промышленного производства этих сталей в условиях комбината «Криворожсталь» оказалась сложной научно-технической задачей и организационно-экономической, что определялось следующими факторами:

 ISSN 1991-7848

- впервые в Украине нужно было осуществить выплавку в конвертерах сложных марок стали легированных тугоплавкими элементами с большим количеством контролируемых параметров по химическому составу в металле без наличия средств внепечной обработки и непрерывной разливки стали;
- необходимостью обеспечения узких марочных пределов содержаний основных элементов и пониженных концентраций серы и фосфора,
- использованием при выплавке стали остродефицитных и дорогостоящих элементов стратегической группы, к которым относят молибден, никель и цирконий;
- сведением к минимуму потерь этих легирующих ферросплавов путем организации сбора образующихся на всех переделах отходов для целенаправленной их к утилизации
- большим числом одновременно осваиваемых марок стали за непродолжительный период времени.

Выполненные промышленные исследования по разработке и освоению технологии выплавки молибден, никель и цирконий содержащих сталей определили следующие особенности разработанной ресурсосберегающей технологии производства новых сталей:

- использование в шихтовке плавки глубоко обессеренного (менее 0,010% серы) чугуна (с тщательным скачиванием шлака из чугуновозных ковшей) и оборотных отходов соответствующих марок стали;
- ввод в завалку конвертерной плавки ферромолибдена и/или ферроникеля из расчета получения содержания молибдена и никеля в полупродукте близком к нижнему марочному пределу в стали;
- обеспечение содержания углерода в металле перед выпуском не более 0,05%;
- использование (при необходимости) корректирующих добавок ферромолибдена и/или ферроникеля, вводимых в конвертер не позднее, чем за 10 минут до конца продувки металла кислородом;
- -стабилизация массы плавки за счет тщательного взвешивания металлошихты и добавок;
- сбор, маркировка, раздельное транспортирование, хранение и использование строго по назначению легированной обрези, брака и других отходов.

Для организации широкого промышленного внедрения технологии выплавки, разливки, прокатки заготовок на катанку диаметром 5,5 и 6,5 мм новых сталей необходимо было решить ряд организационно-технических мероприятий, связанных в первую очередь, с поставкой на комбинат малых партий лигатур. Кроме того, учитывая дороговизну используемых ферросплавов, было признано необходимым привлечение ученых Институт черной металлургии НАН Украины для обязательного авторского контроля при сопровождении технологических процессов выплавки, разливки и прокатки легированных сталей, что позволило свести к минимуму вероятность получения готовой продукции с отклонениями от требований стандартов.

Результаты выполненных исследований и экономических расчетов

Технологической инструкцией по выплавке и легированию молибден и никельсодержащих сталей на КГГМК «Криворожсталь» предусмотрен обязательный учет содержания легирующих элементов в оборотном ломе. Это позволяет избежать накопления примесей цветных металлов в сталях рядовых марок и позволяет снизить расход легирующих ферросплавов. Так, технология выплавки сталей Св-10НМА, Св-08Г1НМА, Св-10ХМ предусматривает использование в среднем 15-30% оборотного лома соответствующей марки стали в металлошихте конвертерной плавки, что обеспечивает значительную экономию дорогостоящих и дефицитных в Украине ферромолибдена и никеля (до 1 кг на тонне выплавляемой стали) и позволяет снизить себестоимость тонны легированной стали в среднем на 5-8 долл. США.

Представляет интерес оценить эффективность использования собственного оборотного лома, содержащего никель и молибден при выплавке стали (в качестве примера возьмем марку Св-10Г1НМА). С этой целью определим приращение приведенного энергосодержания легированного лома за счет наличия в нем никеля и молибдена, как сумму гипотетических затрат на восстановление их из высших окислов с учетом содержания в сплаве по известной методике (Ю.С. Паниотов).

Тепловой эффект реакций образования окислов NiO и MoO_2 составляет по данным разных источников 0,24 и 0,54 МДж/моль металла, соответственно, и, следовательно, суммарное приращение внутреннего энергосодержания лома может быть представлено, как:

$$\Delta Q = \frac{10}{A_{Ni}}[\%Ni](1/2\Delta H^{\circ}_{298(NiO)}) + \frac{10}{A_{Mo}}[\%Mo](\Delta H^{\circ}_{298(MoO_2)})$$

При среднем содержании никеля 0,6% и молибдена 0,77 %, приращение приведенного энергосодержания оборотного легированного составит

$$\Delta Q = 0{,}041 \cdot 0{,}6 + 0{,}056 \cdot 0{,}77 = 0{,}0677 МДж/кг лома$$

Полученная величина сопоставима со значением полного энергосодержания лома 0,2 МДж/кг и 6,9 МДж/кг, проводимым в литературе, что свидетельствует о существенном приращения энергосодержания при наличии никеля и молибдена.

При освоении ресурсосберегающей технологии производства молибден и никельсодержащих сталей установлено, что в составе легирующих ферросплавов, а также легированного лома присутствуют в существенных количествах ценные попутные легирующие элементы – кобальт и вольфрам, наличие которых в стали должно учитываться при оценке качества и свойств металлопродукции. Кроме того, используемый для легирования стали ферроникель поставляется не по содержанию ведущего элемента – никеля, а по сумме содержаний никеля и кобальта. Это ведет к неоправданным издержкам в сталеплавильном производстве, поскольку

 ISSN 1991-7848

содержание кобальта в сталях обычно не определяется и в цене металлпродукции не учитывается.

Контрольным химическим анализом был оценен уровень содержания кобальта в пробах ферроникеля и вольфрама в ферромолибдене, используемых для легирования легированных сварочных сталей. Установлено, что их содержание колеблется от партии к партии и находится в пределах, указанных в таблице 2.

Таблица 2

Содержание попутных элементов в легирующих ферросплавах

Легирующий материал	Содержание элементов, %	
	Кобальт	вольфрам
Первичный никель	0,4-1,2	-
Ферроникель (30-35% Ni)	0,25-0,4	
Ферромолибден (60-64% Mo)	-	0,5-0,5

Естественно, что содержание попутных элементов в металле ковшевой пробы сварочных сталей определяется маркой стали и видом используемого легирующего материала (Таблица 3).

Таблица 3

Содержание попутных легирующих элементов в легированных сварочных сталях

Марка стали	Марочные пределы содержания, %		Легирующий материал	Содержание, %	
	никеля	Молибдена		кобальта	вольфрама
Св-08ГМ	-	0,5-0,7	ферромолибден	-	0,01-0,02
Св-08Г1НМА	0,5-0,7	0,6-0,85	ферроникель ферромолибден	0,05-0,07	0,01-0,03
Св-10НМА	1,0-1,5	0,4-0,55	ферроникель ферромолибден	0,07-0,09	0,01-0,03
Св-08ГСНТ	0,8-1,2	-	ферроникель	0,05-0,07	-
Св-10ГН	0,9-1,2	-	ферроникель	0,05-0,08	

Количества их, обнаруживаемые в легированных сварочных сталях (таблица 3), находятся на уровне, характерном для микролегирования, что не позволяет пренебрегать их влиянием. Кобальт и вольфрам влияют на структурные превращения в стали, проявляя свойства близкие к свойствам никеля и молибдена, соответственно. Учет их действия является и экономически важным, поскольку за несколько последних лет цены на никель возросли втрое, а на молибден – в пять раз. Полученные результаты подтвердили технико-экономическую целесообразность учета попутных элементов, вносимых легирующими материалами при производстве легированных сталей.

Выводы и рекомендации

На основе результатов выполненных исследований внесены изменения в технические условия на катанку и проволоку из легированных молибден

и никель содержащих сталей, регламентирующие учет кобальта и вольфрама, вносимых ферросплавами.

Разработанная технология обеспечила уменьшение расхода ферроникеля и молибденсодержащих лигатур на 3-6%, способствовала снижению себестоимости стали примерно на 3% без изменения качества и свойств металлопродукции.

Промышленная практика показала возможность производства молибден и никель содержащих сталей для сварочной проволоки в конвертерах с получением содержания легирующих близкого к нижним марочным пределам, что увеличило экономию ферроникеля (до 15%) и молибденсодержащих лигатур (до 8%) и обеспечило снижение себестоимости стали на 6-8%.

Немаловажно и то, что комбинат ежегодно увеличивает объемы производства катанки из сложнолегированных низкосернистых молибден, никель и цирконийсодержащих сталей для особо ответственных сварочных проволок, укрепля свой статус производителя качественных сталей и престиж торговой фирмы «Арселор Миттал стил Кривой Рог», выходя на рынок металла с конкурентоспособной продукцией.

 ISSN 1991-7848

УДК 621.763:621.792.4

А.И. Денисенко

О ПРИПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ ЧАСТИЦ В ИНЖЕКЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ СИНТЕЗА МЕТАЛЛОКОМПОЗИТНОГО ЭЛЕКТРОДА

Представлено результати чисельного моделювання механізмів утворення і розвитку приповерхнього шару мікрочастинок для інжекційної технології синтезу металокомпозитного електрода, а також екрануючого впливу цього шару на дисперсну фазу високошвидкісного полідисперсного двофазного потоку, що транспортує інжектуємі мікрочастинки до поверхні металокомпозита.

Представлены результаты численного моделирования механизмов образования и развития приповерхностного слоя микрочастиц для инжекционной технологии синтеза металлокомпозитного электрода, а также экранирующего воздействия этого слоя на дисперсную фазу высокоскоростного полидисперсного двухфазного потока, транспортирующего инжектируемые частицы к поверхности металлокомпозита.

The results of computational modeling of mechanisms of formation and development of the near-surface layer of particles for the injection technology of the metal-composit electrode synthesis and shielding effect of this layer on the dispersed phase of high-speed polydispersed two-phase flow transporting injected particles to the metal-composit surface have been presented.

Введение

В последние годы усиливается интерес к разработкам в области литиевых источников тока [1]. Улучшение технологических и электрохимических характеристик композитных функциональных материалов для электродов источников тока может быть достигнуто с применением принципиально новых технологий синтеза металлокомпозитных электродных структур, основанных на инжекции двухфазными струями частиц дисперсной фазы из литированых оксидов металлов в приповерхностный слой проводника [2]. Известно, что формируемые при механической активации оксидные материалы характеризуются субмикронным размером частиц. Высокая дисперсность способствует проведению процесса внедрения/экстракции ионов лития в кинетическом режиме, что важно для электродов сильноточных быстродействующих первичных и вторичных источников тока [3].

Анализ публикаций

Характерным для газодинамической инжекции двухфазными струями частиц дисперсной фазы из литированых оксидов металлов в приповерхностный слой металлической матрицы электрода является разгон микрочастиц в потоке холодного или слабоподогретого газа, поэтому образование прочного сцепления на контакте с основой возможно только за

© ДЕНИСЕНКО А.И., 2006

счет преобразования кинетической энергии частиц при ударе в разогрев и деформацию материала основы [4]. Исследование процессов соударения потока твердых оксидных микрочастиц (в пределах диапазонов размеров 0,01 – 20 мкм и скоростей 100 – 800 м/с) с преградой из матричного металла электрода представляет значительный фундаментальный и практический интерес.

Специфической особенностью инжекции оксидных микрочастиц в приповерхностный слой матричного металла электрода относительно газодинамического напыления металлических порошков является перемещение области локализации пластической деформации от ударяющей частицы к ударяемой поверхности, теплофизические процессы на которой и определяют механизм закрепления частицы [5].

Известно, что одной из основных технологических проблем оптимизации динамических параметров при высокоэнергетической обработке материалов является экранирование обрабатываемой поверхности продуктами эрозии. Например, величина ослабления лазерного излучения эрозионным факелом продуктов эрозии с поверхности природных материалов под действием интенсивного лазерного излучения определяется помимо селективного поглощения излучения молекулами газов, входящих в его состав, также поглощением и рассеянием излучения аэрозолем (размеры частиц 0,06-0,15 мкм), экранированием твердыми осколочными частицами (размеры частиц 1-60 мкм) и брызгами расплава (размеры частиц 10-80 мкм), выбрасываемыми с облучаемой поверхности [6].

При воздействии высокоскоростной двухфазной струи, включающей разогнанные для инжекции частицы дисперсной фазы, на поверхность металлокомпозита в процессе его формирования, некоторые частицы вследствие разных причин не закрепляются в металлокомпозите в процессе удара о его поверхность. Эти частицы присутствуют вблизи поверхности формируемого металлокомпозита в зоне воздействия высокоскоростной двухфазной струи до тех пор, пока не будут вынесены из неё транспортирующим новые порции инжектируемых частиц газом [7].

Принято считать [8], что профиль скорости сверхзвуковой струи транспортирующего газа, вытесняемой вдоль формируемой поверхности (в рассматриваемом случае – поверхности металлокомпозита), можно принять аналогичным профилю скорости в свободной осесимметричной струе, поскольку толщина пристеночного газодинамического пограничного слоя весьма незначительна и максимум скорости в пристеночной полуограниченной струе располагается практически вдоль поверхности.

Кратковременное присутствие не закрепившихся в формируемом металлокомпозите при ударном взаимодействии оксидных частиц, временно локализованных вблизи его поверхности, может привести к их столкновениям с частицами, транспортируемыми в составе высокоскоростной двухфазной струи. Каждое такого рода столкновение способно существенно изменить импульс разогнанной для инжекции

оксидной частицы как по величине, так и по направлению, и вывести его за пределы диапазона осуществимости инжекции.

Постановка задачи

Потребность в оценке степени экранирования поверхности формируемого металлокомпозита частицами, вследствие разных причин не закрепившимися в процессе удара о его поверхность, связано с необходимостью обеспечения экономически целесообразного и эффективного использования таких ресурсов, как электроэнергия, сжатый газ, порошки электрохимически авктивных оксидов и т. д. Поэтому исследование механизмов образования и развития приповерхностного слоя частиц для инжекционной технологии синтеза металлокомпозитного электрода, а также экранирующего воздействия этого слоя на дисперсную фазу высокоскоростного полидисперсного двухфазного потока, транспортирующего инжектируемые частицы к поверхности металлокомпозита при его формировании, является важной задачей. Это и определяет главную цель данной работы.

Основная часть

Модельное приближение механизмов формирования приповерхностного экранирующего слоя частиц.

Рассмотрим в качестве модельного монодисперсный, моноскоростной поток равномерно распределенных в пространстве и разогнанных для инжекции частиц, налетающих на поверхность металлокомпозита вдоль нормали к ней. В этом приближении воздействие дисперсной фазы на поверхность может быть охарактеризовано количественно частотой ν ударов частиц по площадке единичного сечения. Этот параметр определяется в совокупности площадью сечения S двухфазной струи, скоростью v и объемной концентрацией n частиц дисперсной фазы в пределах этой струи:

$$\nu = S \cdot v \cdot n \qquad (1)$$

Образуем отношением частоты $\nu_{от}$ событий отскоков частиц к частоте ν ударов по поверхности всех частиц, на нее налетающих, параметр $к_о = \nu_{от} / \nu$, определив таким образом коэффициент отскока с диапазоном возможных значений в пределах от 0 до 1 [5].

Эффективное поперечное сечение столкновения σ (или просто сечение столкновения) для одинаковых частиц, характеризуемых диаметром D, принято [9] определять соотношением:

$$\sigma = \pi \cdot D^2 . \qquad (2)$$

Обозначим символом $S_{эк}$ площадь части поверхности, экранируемую локализованными вблизи неё частицами:

$$s_{эк} = \sigma \cdot N , \qquad (3)$$

где N– число частиц над 1 см^2 поверхности.

Частоту $\nu_{от}$ событий отскоков от поверхности (от площадки в 1 см^2) налетающих на нее в составе высокоскоростной двухфазной струи частиц, проникаюших через экранирующий слой, состоящий из локализованных вблизи поверхности частиц, определим соотношением:

$$\nu_{от} = к_о \frac{S - S_{эк}}{S} \cdot \nu . \qquad (4)$$

Частоту $\nu_{сч}$ событий соударений частиц приповерхностного экранирующего слоя и частиц из высокоскоростной двухфазной струи, определим соотношением:

$$\nu_{сч} = \frac{S_{эк}}{S} \cdot \nu . \qquad (5)$$

Используя соотношения (4) и (5), сформируем функциональную связь величин $\frac{S_{эк}}{S}$ и $к_о$, соответствующую условию равенства интенсивностей событий отскоков частиц высокоскоростной двухфазной струи от поверхности и от частиц, локализованных вблизи поверхности:

$$\frac{S_{эк}}{S} = \frac{к_о}{к_о + 1} . \qquad (6)$$

График функции (6) представлен на Рис. 1. Отметим, что на координатном поле Рис. 1 над линией равной интенсивности пополнения экранирующего приповерхностного слоя частицами по механизмам отскоков и соударений преобладает по интенсивности механизм соударений между частицами, а под линией – механизм отскоков частиц от поверхности.

Пополнение приповерхностного слоя частицами, не закрепившимися на поверхности в процессе ударного взаимодействия.

С учетом соотношений (4) и (3) определим функциональную зависимость от времени t числа частиц N в экранирующем приповерхностном слое в приближении формирования его исключительно за счет отскоков частиц от поверхности:

$$N = \nu_{от} \cdot t = к_о \frac{S - S_{эк}}{S} \cdot \nu \cdot t = к_о \frac{S - \sigma \cdot N}{S} \cdot \nu \cdot t . \qquad (7)$$

Прирост dN количества частиц, составляющих экранирующий приповерхностный слой в момент времени t, за бесконечно малое время dt определим соотношением:

$$dN = к_о \cdot (1 - \frac{\sigma \cdot N}{S}) \cdot \nu \cdot dt . \qquad (8)$$

 ISSN 1991-7848

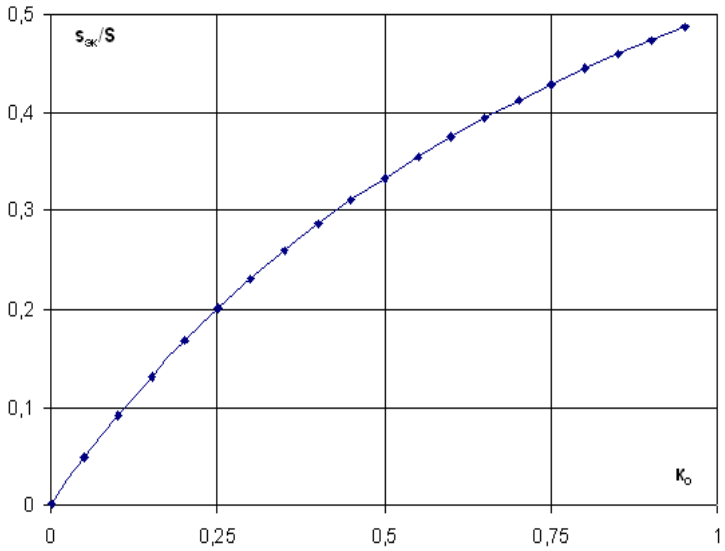


Рисунок 1 - Линия равной интенсивности пополнения частицами приповерхностного экранирующего слоя по механизмам соударений их с поверхностью и с частицами этого слоя

Решение уравнения (8), представим в виде:

$$N = \frac{s}{\sigma}\left(1 - e^{-\frac{\sigma \cdot \kappa_o \cdot \nu \cdot t}{s}}\right). \qquad (9)$$

Функция (9), характеризующая зависимость от времени числа частиц N (над 1 см^2 поверхности) в экранирующем приповерхностном слое с учетом фактора уменьшения доступной для инжектируемых частиц поверхности вследствие ее экранирования, представлена на Рис. 2а (линия 2) в сравнении с линейной зависимостью

$$N = \kappa_0 \cdot \nu \cdot t \qquad (10)$$

(линия 1), не учитывающей этого фактора, рассчитанная для одного и того же набора численных значений параметров K_0, ν и σ.

Отметим, что в момент отскока от поверхности частицы имеют преимущественно нулевой в направлении касательной к этой поверхности импульс, что определяет неизбежность существования интервала времени, в течение которого струей транспортирующего газа (или другим способом) таким частицам передается соответствующий импульс и происходит их вынос из экранирующего слоя.

В дальнейших оценках используем приближение равенства этого интервала времени для всех частиц, а именно, – что каждая пополнившая экранирующий слой частица покидает его через время $\tau_{ср}$ после момента пополнения.

На Рис. 2б представлен пример полученных численными методами зависимостей от времени числа частиц N (над 1см^2) в экранирующем слое как с учетом (линия 2), так и без учета (линия 1) фактора уменьшения

доступной для инжектируемых частиц поверхности мишени вследствие ее экранирования при условии выхода частиц из “облака” через время $\tau_{ср}$ после входа. Отметим, что "равновесное" количество N частиц в экранирующем слое над единицей поверхности может определяться балансом пополнения отскочившими или не закрепившимися в процессе удара о поверхность частицами и сдувания их приповерхностным газовым потоком, транспортирующим частицы за пределы области воздействия высокоскоростного двухфазного потока на поверхность. Формирование за время $t = \tau_{ср}$ стационарного в последующем экранирующего слоя с числом составляющих его частиц, определяемым соотношением:

$$N = \kappa_0 \cdot \nu \cdot \tau_{ср} \qquad (11)$$

наблюдается в рамках модели, не учитывающей фактор уменьшения доступной для инжектируемых частиц поверхности вследствие ее экранирования (линия 1 Рис. 2б). Учет этого фактора (линия 2 Рис. 2б) приводит к появлению эффекта колебательной релаксации числа частиц экранирующего слоя к меньшим относительно определяемых по формуле (11) значениям.

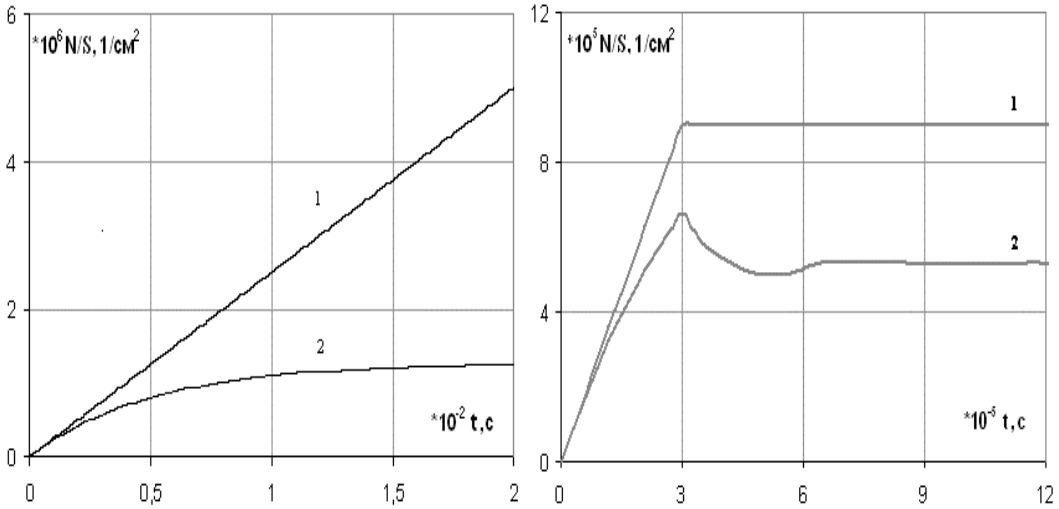


Рисунок 2 - Примеры динамик формирования экранирующего поверхность слоя отскакивающими от нее частицами без учета (а) и с учетом (б) выхода частиц из него через время $\tau_{ср}$ после входа, а также без учета (1) и с учетом (2) уменьшения доступной для инжекции частицами поверхности вследствие ее экранирования.

Пополнение приповерхностного слоя соударениями частиц над поверхностью

С учетом соотношений (5) и (3) определим функциональную зависимость числа частиц в экранирующем поверхность слое, формируемом по механизму соударений между частицами, от времени:

$$N = N_0 + \nu_{сч} \cdot t = N_0 + \frac{s_{эк}}{s} \cdot \nu \cdot t = N_0 + \frac{\sigma \cdot N}{s} \cdot \nu \cdot t \,. \qquad (12)$$

Определим прирост dN количества частиц экранирующего слоя за бесконечно малое время dt соотношением:

$$dN = \frac{\sigma \cdot N \cdot \nu}{s} dt \,. \qquad (13)$$

Решение уравнения (13) представим в виде:

$$N = N_0 \cdot e^{\frac{\sigma \cdot \nu \cdot t}{s}} \,. \qquad (14)$$

На Рис. 3 приведены примеры зависимостей от времени числа частиц в экранирующем слое как без учета (линия 1), так и с учетом (линия 2) выхода частиц из этого слоя через время $\tau_{ср}$ после входа, рассчитанных для одного и того же набора численных значений параметров ν, σ и N_0.

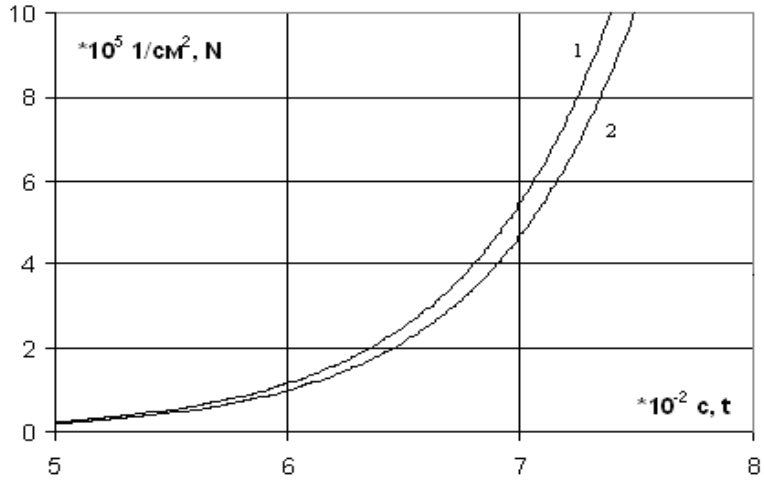


Рисунок 3 - Динамика образования экранирующего слоя при формировании его соударениями между частицами без учета (1) и с учетом (2) выхода частиц из него через время $\tau_{ср}$ после входа

На Рис. 4. приведена полученная численными методами двумерная зависимость величины t длительности формирования (только соударениями между частицами) экранирующего слоя, перекрывающего 50% поверхности, от среднего времени $\tau_{ср}$ пребывания частиц в этом слое и частоты ν, рассчитанная для одного и того же набора численных значений параметров σ и N_0. Из результатов модельных расчетов, представленных на Рис. 4, следует, что множеству сочетаний варьируемых параметров в пределах диапазонов для частоты ν – $(1–9)\cdot10^8$ 1/(с·см^2) и времени $\tau_{ср}$ – $(1–10)\cdot10^{-5}$ с соответствует диапазон 0,013 – 0,173 с длительностей

развития 50%–го экранирования поверхности динамической структурой в виде приповерхностного слоя частиц.

Пополнение частицами приповерхностного экранирующего слоя в общем случае происходит при совместном проявлении обоих упомянутых выше механизмов.

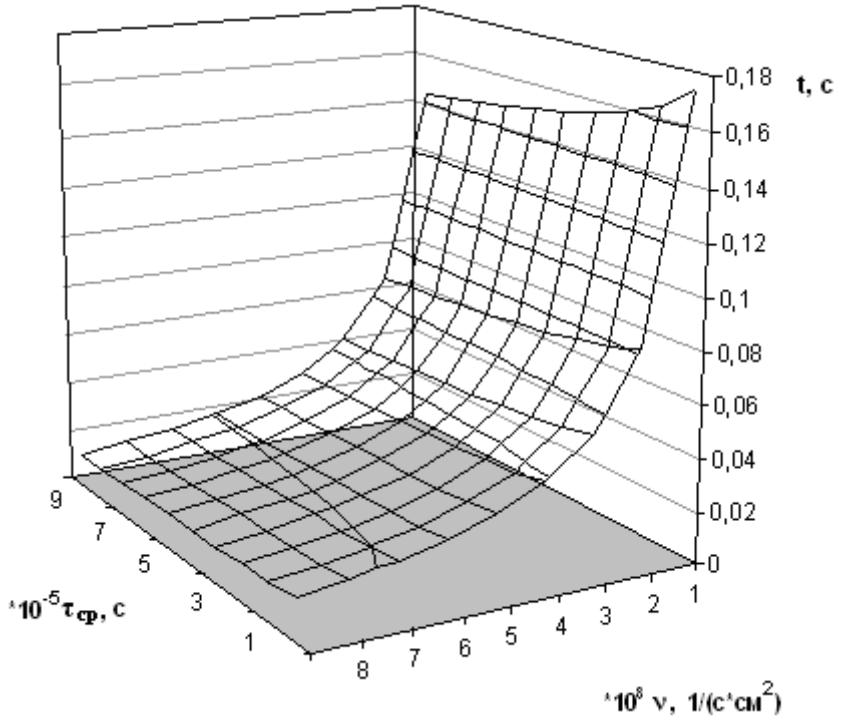


Рисунок 4 - Пример оценки длительностей достижения уровня 50%-го экранирования поверхности слоем, формируемым по механизму соударения между частицами, в зависимости от среднего времени $\tau_{ср}$ пребывания частиц в слое и частоты ν.

Трансформация функции распределения по размерам частиц полидисперсной двухфазной струи вследствие взаимодействия с экранирующим приповерхностным слоем.

Проследим трансформацию функции распределения по размерам частиц дисперсной фазы от исходной, характеризующей частицы, подлетающие в составе высокоскоростной двухфазной струи к приповерхностному экранирующему слою, до итоговой, характеризующей частицы, ударяющиеся в поверхность мишени после проникновения сквозь экранирующий приповерхностный слой.

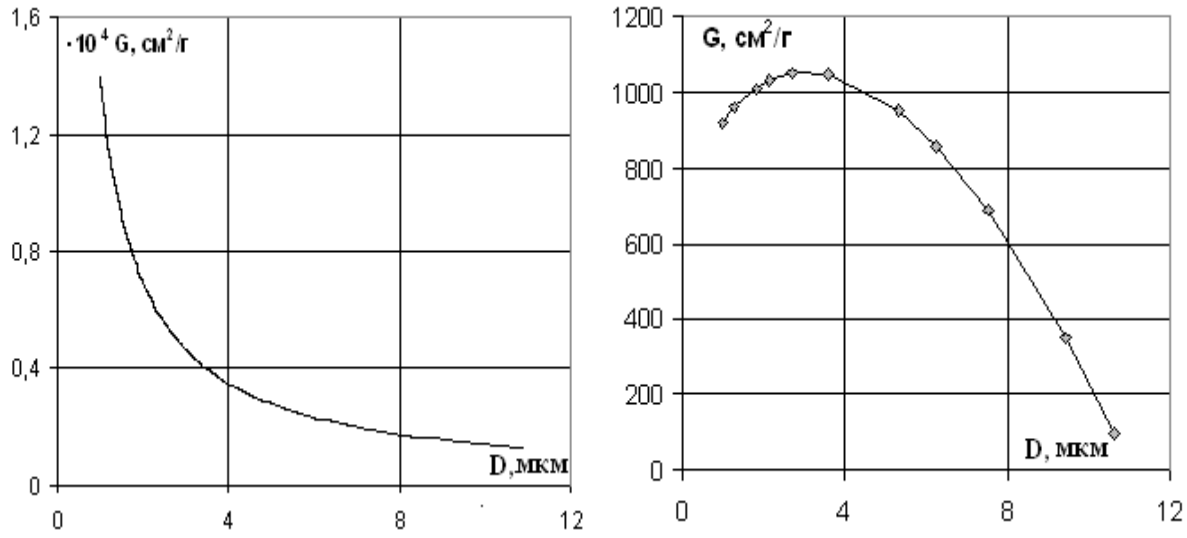
Различие размеров экранирующей поверхность частицы (R) из полидисперсного приповерхностного слоя и налетающей на нее частицы (r) полидисперсной двухфазной струи проявится в величине эффективного поперечного сечения столкновения, определяемого в этом случае (в отличие от (2)) соотношением:

$$\sigma = \pi \cdot (r + R)^2 . \qquad (15)$$

 ISSN 1991-7848

Сравнение по величине эффекта экранирования от набора монодисперсных частиц и от составленного из них полидисперсного потока представляется перспективным осуществить через такой технологичный параметр, как массовый расход дисперсного материала. Одинаковые массовые расходы для полидисперсного и монодисперсных потоков частиц дисперсной фазы могут быть использованы для сравнения приведенной к единице массы величины экранируемой поверхности.

На Рис. 5б приведен график полученного с применением численного моделирования распределения экранируемой полидисперсным набором частиц поверхности мишени по их размерам, отнесенной к массам соответствующих частиц.



а б

Рисунок 5 - Зависимость от размера экранирующих частиц площади экранирования, приходящейся на единицу их массы: (а) – для модельных монодисперсных наборов частиц; (б) – полидисперсного их набора.

В области первой трети мелкодисперсного крыла функции распределения частиц по размерам, представленной на Рис. 5б, наблюдается максимум, который интенсифицирует столкновительный механизм снабжения экранирующего слоя частицами этих размеров. Увеличение с течением времени относительной доли в экранирующем слое частиц, соответствующих упомянутому выше максимуму, приведет к полному экранированию поверхности мишени от частиц с этими и меньшими размерами. В то же время для крупнодисперсного крыла графика, представленного на Рис. 5б, с увеличением размера частиц наблюдается снижение экранирующей способности приповерхностного слоя.

Из анализа графиков, представленных на Рис. 5, следует:

1 – монодисперсные потоки частиц эффективнее в экранировании относительно полидисперсных в расчете на единицу массы дисперсной фазы;

2 – с уменьшением размера частиц для монодисперсного набора резко возрастает эффективность экранирования приповерхностным слоем частиц в расчете на единицу массы дисперсной фазы.

Выводы

Взаимодействие динамической структуры в виде приповерхностного слоя частиц, еще не покинувших после ударного столкновения зону действия высокоскоростной двухфазной струи на поверхность электрода, с разогнанными и транспортируемыми этой струей оксидными частицами управляет возможностью их инжекции в формируемый в приповерхностном слое электрода металлокомпозит.

В результате исследований с применением численного моделирования выделены два механизма пополнения приповерхностного экранирующего слоя частиц: первый – частицами, не закрепившимися на мишени при ударе о ее поверхность, второй – частицами, участвовавшими в межчастичных соударениях над поверхностью мишени. Вследствие первого из упомянутых механизмов некоторое ограниченное коэффициентом отскока количество частиц с экранирующим эффектом воспроизводимо присутствует над поверхностью мишени, постоянно поддерживая условия для осуществления второго механизма пополнения по экспоненциальному закону экранирующего слоя частицами вплоть до достижения полной экранировки приповерхностным слоем частиц поверхности мишени от частиц двухфазного потока при соответствующем сочетании определяющих параметров.

В процессе взаимодействия дисперсной фазы полидисперсной высокоскоростной двухфазной струи с формируемым ею приповерхностным экранирующим слоем из частиц, кратковременно локализованных вблизи поверхности, функция распределения по размерам, характеризующая частицы, ударяющиеся в поверхность после проникновения сквозь экранирующий приповерхностный слой, обедняется в области мелкодисперсного крыла относительно исходной, характеризующей частицы в составе высокоскоростной двухфазной струи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фундаментальные проблемы электрохимической энергетики: Материалы VI Междунар. конф./Под ред. И.А. Казаринова. – Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 2005. – 568 с.
2. Kalinuskin Y., Pinchuk S., Levko O. Lithium manganese dioxside (LiMn2O4) perspective cathode material for power-consuming and portable battery // Advances in metallurgical processes and materials (AdMet 2007). Proceedings of the International conference. V.2. – Dnipropetrovsk: Porohy, 2007. – P. 143-148.).

 ISSN 1991-7848

3. Косова Н. В., Девяткина Е. Т. Высокодисперсные катодные материалы для литий-ионных аккумуляторов, полученные с применением механической активации // Химия в интересах устойчивого развития, 2004. – № 3, . –Т. 12. – С. 349-354.
4. Данченко В.Н., Головко А.Н., Кондратьев А.С. Особенности газодинамического напыления различных металлических порошков // Высокоэнергетическая обработка материалов Сб. научн. тр. Национальной горной академии Украины. – Днепропетровск, 1999. – № 8. – С. 122–126.
5. Денисенко А.И. К инжекционному методу формирования металлокомпозитного катода // Физика и техника высокоэнергетической обработки материалов. – Днепропетровск: АРТ-ПРЕСС, 2007. – С. 108-118.
6. Денисенко А.И. Плазменный факел при лазерной лучевой эрозии природных минеральных сред // Материалы Международной научно-практической конференции “Дни науки ‘2005”. – Т.38. Физика. – Днепропетровск: Наука и образование, 2005. – С. 36-38.
7. Денисенко А.И. К оптимизации инжекционного метода формирования металлокомпозитного электрода // Материалы I Международной научно-практической конференции "Научное пространство Европы – 2007”. – Т.10. Технические науки. – Днепропетровск: Наука и образование, 2007.– С. 22-25.
8. Гичёв Ю.А., Перцевой В.А. Сравнение инженерной модели с численным методом определения запирающих свойств газовой струи // Зб. праць науково-технічної конференції “Прикладні проблеми аерогідромеханіки та тепломассопереносу”. – Дніпропетровськ: ДНУ, 2006. – С.34-35.
9. Кингсеп А.С., Локшин Г.Р., Ольхов О.А Основы физики. Курс общей физики: Учебн. В 2 т. –Т. 1. / Под ред. А.С. Кингсена. –М: ФИЗМАТЛИТ, 2001. –560 с.

УДК 620.197

О.Е.Чигиринець

ПРОКОРОДОВАНИЙ МЕТАЛ І ЯК ЙОГО ЗАХИСТИТИ ЛАКОФАРБОВИМ ПОКРИТТЯМ

Проанализированы причины снижения срока защитного действия лакокрасочных покрытий, нанесенных на прокорродировавшую поверхность, и пути инертизации слоя ржавчины. Показано, что для эффективного воздействия на ржавчину с целью снижения химической активности необходимо растворить ее составляющие с низкой стабильностью и связать освобожденные катионы металла в нерастворимые комплексные соединения. Косточковое растительное сырье может быть использовано в качестве основы для создания эффективного антикоррозионного наполнителя для лакокрасочных покрытий, предназначенных для защиты прокорродировавшей металлической поверхности.

Проаналізовані причини зниження терміну захисної дії лакофарбових покриттів, нанесених на прокородовану поверхню та шляхи інертизації шару іржі. Показано, що для ефективного впливу на іржу з метою зниження хімічної активності потрібно розчинити її складові з низькою стабільністю та зв’язати звільнені катіони Ферума в нерозчинні комплексні сполуки. Кісточкова рослинна сировина може бути використано в якості основи для створення ефективного антикорозійного наповнювача для лакофарбових покриттів, що призначені для захисту прокородованої металевої поверхні.

The reasons of decrease of term of paint varnish materials protective action put on rusted surface, and way of a rust layer decrease of activity are analyzed. Is shown, that for effective influence on a rust with the purpose of decrease of chemical activity it is necessary to dissolve its low stability components with and to connect released cations of metal into insoluble complex connections. Stone vegetative raw material can be used as a basis for creation of effective anticorrosive filler for paint varnish coatings intended for protection rusted metal surface.

Лакофарбові покриття (ЛФП) завдяки економічності, зручності і простоті нанесення та достатній стійкості при експлуатації є поширеним засобом захисту чорних металів від корозії.

Наукові аспекти захисту металу від корозії лакофарбовими покриттями

Вважають, що лакофарбова плівка захищає метал за рахунок впливу на механізм і на кінетику процесу корозії металу. Ефективність цього захисту визначається наступними факторами: механічною ізоляцією металу від агресивного середовища; адгезією, що перешкоджає утворенню нової фази (іржі) на межі розділу метал – плівка; гальмуванням електродних реакцій, що зумовлюють корозійний процес; структурними перетвореннями в плівках, що визначають властивості покриттів [1].

Протикорозійна тривкість покриттів за рахунок механічної ізоляції металу забезпечується відсутністю пор у плівці, її непроникністю для води, кисню та йонів електролітів. В той же час, відомо, що практично через всі покриття вода і кисень проникають до поверхні металу за короткий час,

© ЧИГИРИНЕЦЬ О.Е., 2006

 ISSN 1991-7848

причому у кількості, достатній для утворення продуктів корозії. Тому ізоляція металу не може бути головним фактором в захисті металу. Авторами [2] обґрунтована значно більша роль в захисній дії покриттів адгезії, ніж проникності плівки, як фактора, що перешкоджає гальмуванню анодної реакції корозії і утворенню нової фази (іржі) на межі метал – плівка.

Поверхня металу за своєю природою є гідрофільною, і, як правило, містить як фізично, так і хімічно адсорбовану воду. При цьому, залежно від вологості повітря та адсорбційної здатності металу на поверхні металу можуть утримуватися до декількох десятків моношарів води. Із врахуванням присутності на поверхні металу значного шару сорбованої води можна допустити, що контакт полімеру відбувається не тільки з металом, а також з адсорбованим шаром води, а це викликає зниження адгезії. Саме тому наявність на поверхні металу молекул води, здатної до гідролізу плівкоутворювача, є основною причиною зниження адгезії покриттів, особливо в процесі їх експлуатації у вологих середовищах.

Максимальна стійкість лакофарбових покриттів досягається при нанесенні їх на очищені від продуктів корозії металеві поверхні. Але, сталь термодинамічно нестійка і на повітрі швидко кородує. Тому, в умовах ремонтних робіт жорстке дотримання вимог по підготовці металевої поверхні неможливо. А самі лакофарбові матеріали наносять на металеву поверхню із тонкими шарами іржі, яка, в свою чергу, є гігроскопічною і додатково утримує корозійно агресивні компоненти (кисень, вологу, агресивні гази). Наявність цих складових корозійного механізму, необхідних для протікання електрохімічних реакцій, призводить до того, що навіть під лакофарбовим покриттям зростання іржі не припиняється.

Основними компонентами іржі в електролітах в умовах доступу кисню є продукти повного окиснення заліза – гетит (α-FeOOH), лепідокрокіт (γ-FeOOH), а також невелика кількість магнетиту, що утворюється на поверхні металу при нестачі кисню. На відміну від основних компонентів іржі γ- і α-FeOOH, магнетит є нестабільною фазою. В присутності кисню він здатний перекристалізовуватися в гідроксид Ферума (III). Але найбільш небезпечною фазою з декількох причин є аморфний гідроксид $Fe(OH)_3$. Проблема полягає у тому, що з часом він здатний перетворюватися на кристалічні продукти із значним скороченням питомого об'єму.

При нанесенні лакофарбового покриття по іржавій металевій поверхні умови його утворення і експлуатації значно змінюються. Адгезію такого покриття визначатиме адгезія самого шару іржі до металу і зв'язок з нею лакофарбового матеріалу. Саме зростання іржі на поверхні металу під лакофарбовою плівкою є причиною значного зниження терміну захисної дії лакофарбових покриттів.

Кукурс О. і його колеги [3] позначають декілька причин, які викликають передчасне руйнування покриттів, що наносяться по іржі. По-перше, дегідратація аморфного гідроксиду і кристалізація гетиту приводить до

значних структурних змін в шарі іржі, які супроводжуються перетвореннями кристалічного шару в пухкий порошок продуктів корозії. За рахунок зменшення питомого об'єму іржі до 15-20% відбувається розшарування іржі (на відстані 10 мкм від поверхні металу), яке приводить до втрати адгезії покриття. Крім того, за місцем агресивних включень можливе утворення локальних вогнищ корозії (“сульфатних гнізд”, заповнених сольовими розчинами).

Традиційні ґрунтові лакофарбові покриття містять спеціально підібраний набір пігментів та наповнювачів (наприклад, хроматів, фосфатів, боратів, феритів і ін), які, за рахунок адсорбції їх водорозчинних іонів, здатні до гальмування підплівкових корозійних процесів на поверхні очищеного металу. При нанесенні на іржу такі покриття не можуть виконувати свої функції через блокування металевої поверхні продуктами атмосферної корозії. **Тому традиційні лакофарбові покриття не можуть використовуватися для захисту від корозії заіржавілих металевих поверхонь.**

Отже, базуючись на особливостях механізму утворення іржі та її зростання в процесі експлуатації покриття, що нанесене на прокородовану поверхню, стає зрозумілим, що край необхідним є розробка спеціальних методів впливу на іржу. Це може бути досягнуто попередньою обробкою іржі розчинами перетворювачів іржі або введенням в покриття спеціальних хімічно активних речовин по відношенню до продуктів корозії.

Історично першим виник спосіб обробки прокородованої металевої поверхні водорозчинними композиціями перетворювачів іржі (або, як їх називали модифікаторами), які не завжди давали позитивні результати. Нестабільний перетворюючий ефект цих матеріалів був пов'язаний з невідповідністю кількості кислот і іржі на поверхні металу, що захищається. При малій товщині шару іржі надлишок кислотності цих композицій призводив до передчасного виходу покриттів з ладу. Крім того, при застосуванні рідких складів збільшувалася трудомісткість робіт, будучи досить токсичними вони вимагали певних заходів безпеки. При цьому, ґрунтувальні лакофарбові матеріали з перетворюючими властивостями мають значні переваги. При нанесенні ґрунтовок першим шаром по іржавому металу окремої обробки, окрім попереднього зняття рихлих продуктів корозії, не потрібно. Ставлення при роботі з ґрунтами-перетворювачами іржі аналогічно традиційним лакофарбовим матеріалам. Вартість обробки такими складами не перевищує вартості робіт по очищенню металевої поверхні від іржі.

Ґрунти-перетворювачі іржі, які останнім часом з’явилися на ринку лакофарбової продукції, набули широкого поширення завдяки простоті нанесення і достатньо високій антикорозійній ефективності, що дозволяє забезпечити якісну антикорозійну обробку заіржавілих металевих поверхонь (в польових умовах, в важкодоступних місцях, при висотних роботах на монтажі та ремонті металоконструкцій, тощо). У зв'язку з цим

 ISSN 1991-7848

ґрунти-перетворювачі на сьогодні займають гідне місце на ринку лакофарбової продукції.

Але, для виготовлення таких ґрунтових покриттів для фарбування іржі, зарубіжними виробникам лакофарбової продукції досить часто використовуються токсичні хімічні добавки, які, при руйнуванні цих покриттів, забруднюють навколишнє середовище.

Метою досліджень автора було створення ефективних та екологічно безпечних протикорозійних складових (наповнювачів) покриттів, призначених для введення в рецептури лакофарбових ґрунтувальних матеріалів для нанесення по іржі.

Характеристика сировини для протикорозійного наповнювача в лакофарбові покриття, що наносяться на іржу

Першими протикорозійними наповнювачами такого типу (або порошковими перетворювачами іржі) були добавки на основі лігніну гідролізного, багатотоннажного відходу гідролізної промисловості України. Але в 90-х роках всі три гідролізних заводи (Запорізький, Миколаївський, Верхньодніпровський) були зупинені, тому свіжий лігнін, що використовувався для виробництва перетворювачів, сьогодні відсутній. В той же час, лакофарбова промисловість постійно отримувала заявки на виготовлення лакофарбових матеріалів для захисту від корозії прокородованих металевих поверхонь. Тому , актуальною задачею був терміновий пошук альтернативної лігніну сировини.

Оскільки гідролізний лігнін є відходом переробки рослинної сировини, то, в першу чергу, увагу заслуговували багатотоннажні відходи рослинного походження. Так, через сприятливі кліматичні умови в Україні достатньо розвинена харчова промисловість, що переробляє у великих кількостях фрукти (персика, абрикоса, вишні), ягоди (виноград), горіхи, відходами яких є кісточки та шкаралупа.

Деякі з цих відходів (шкаралупа горіхів, кісточки персику та абрикосу) раніше використовували при виготовленні лакофарбових покриттів, але, через відсутність знань про їх хімічну природу, тільки в якості інертних наповнювачів. В той же час, ця рослинна сировина дуже багата на хімічно активні органічні сполуки, які містяться в екстрактивній частині (від 3 до 12%) [4].

Вперше власними дослідженнями був докладно вивчений хімічний склад екстрактивної частини вказаних кісточкових відходів. Мас-спектральним аналізом встановлено, що в кісточковій сировині містяться такі класи органічних сполук, як аліфатичні жирні кислоти і альдегіди, похідні фенолу, гваяколу і пірокатехіну, ароматичні та сульфурвмісні сполуки [5]. Усереднені дані про вміст екстрактивних речовин в кісточках представлені на рис. 1.

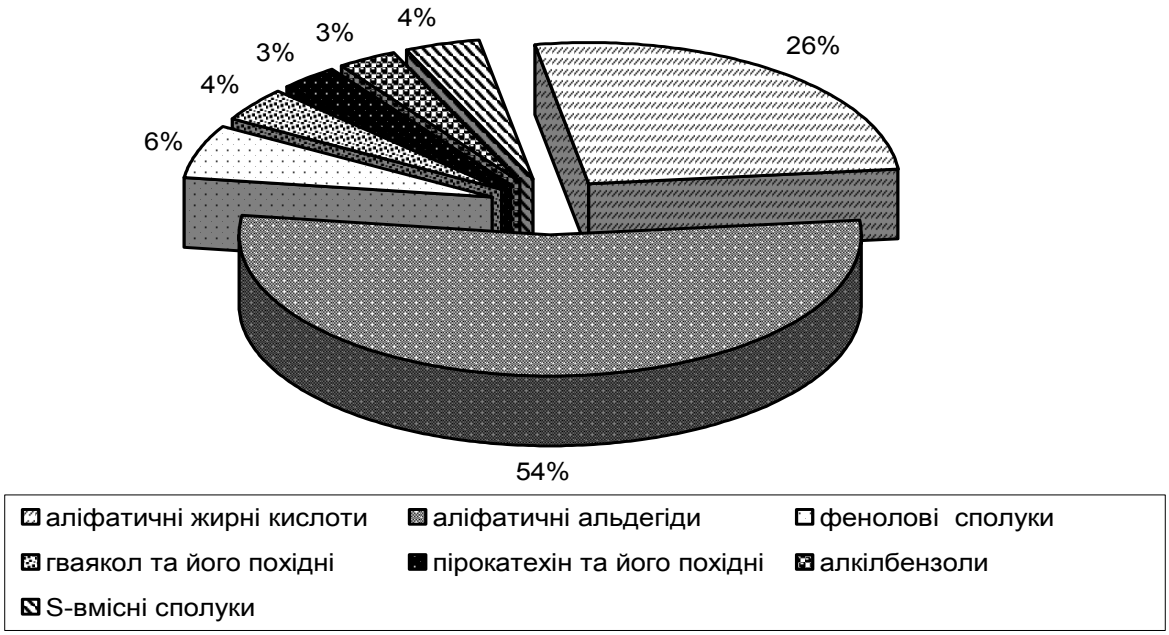


Рисунок 1 - Діаграма розподілу основних типів сполук у водних екстрактах кісточкових порошків

В той же час, вивчення фізико-хімічних властивостей кісточкових екстрактів показує, що вони досить сильно відрізняються один від одного.

Природа механізму «перетворюючої» дії кісточкової сировини

Найбільш хімічно активними в екстрактах є жирні кислоти та похідні пірокатехіну. Особливістю ряду аліфатичних жирних кислот є той факт, що із зростанням молекулярної маси змінюються і їх властивості. Так, низькомолекулярні жирні кислоти (кількість атомів Карбону в молекулі жирної кислоті до 3) хімічно агресивні і здібні розчинювати оксиди металів за реакцію:

$$FeOOH + 3H^{+} \rightarrow Fe^{3+} + 2H_2O$$

Навпаки, високомолекулярні жирні кислоти є відомими інгібіторами корозії, які за рахунок адсорбції на поверхні розділу метал - розчин ефективно захищають метал в агресивних середовищах. Маючи здатність до асоціювання між собою, високомолекулярні жирні кислоти можуть формувати щільні поверхневі плівки за рахунок утворення водневих зв’язків між атомами Оксигену або Нітрогену (в кісточках присутні амінокислоти), з яких хоча б один має вільну електронну пару (рис.2.) [6].

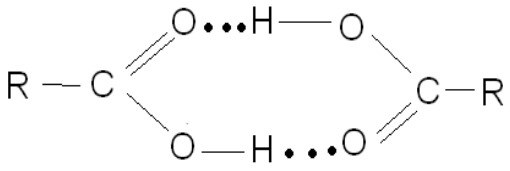


Рисунок 2 - Схема утворення водневих зв’язків між молекулами жирних кислот

Тобто, високомолекулярні жирні кислоти кісточкової сировини можуть блокувати іржу від кисню та води.

 ISSN 1991-7848

Таким чином, співвідношення високо- і низькомолекулярних жирних кислот в кісточковій сировині може відігравати суттєву роль в інертизації іржі, яка може відбуватися тільки за умови часткового розчинення нестабільних оксидів заліза іржі. Причому «не перетворені» стабільні оксиди Феруму не будуть впливати на хімічну активність шару іржі.

Важливим моментом при інертизації продуктів атмосферної корозії є необхідність забезпечення процесу звільнення катіонів металу, які в подальшому можуть бути використані при утворенні стабільних хімічних сполук. Отже, «перетворююча» дія кісточкової сировини передбачає, перш за все, розчинення нестабільних складових іржі з метою подальшого утворення більш стабільних сполук.

Слід відмітити, що наявність в кісточковій сировині органічних сполук дозволяє досить «лагідно» перетворювати іржу на поверхні металу на відміну від механізму дії перетворювачів іржі, виготовлених на основі ортофосфорної кислоти. Остання дуже агресивна і може утворювати не тільки стабільні, але і розчинні фосфати Ферума, що призводить до різкого зменшення перетворюючого ефекту таких композицій.

Розподіл жирних кислот в екстрактивній частині кісточкової сировини представлений на рис.3.

Аналіз результатів свідчить про те, що деякі види кісточкової сировини мають виражену здатність до розчинення іржі (виноградна кісточка), а інші, навпаки, – більш здатні до інгібування корозійних процесів (персикова кісточка).

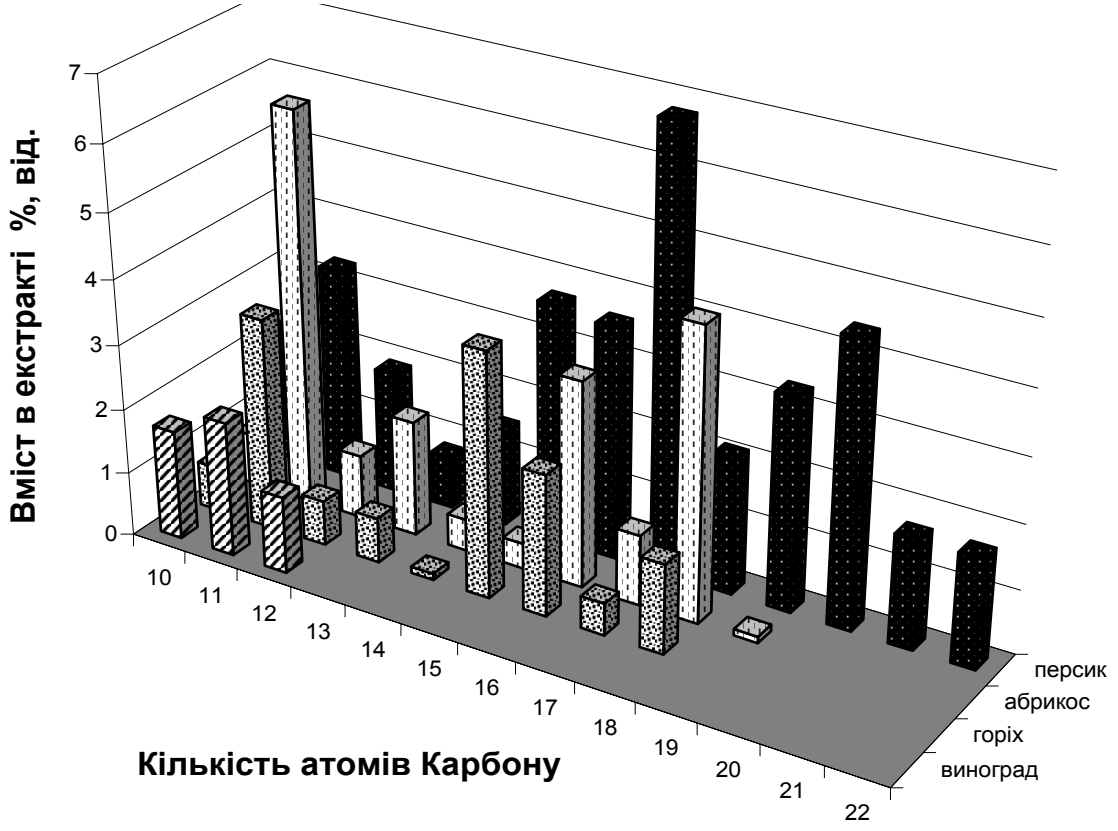


Рисунок 3 - Розподіл жирних кислот в водних екстрактах кісточкових порошків

Результати досліджень хімічного складу плівок (методом Оже-спектроскопії на установці JEOL-10S фірми Jamp), утворюваних на поверхні прокородованого металу в воді та екстрактах кісточкових порошків (витримка 15 хвилин у водних 7%-них екстрактах), підтверджують адсорбційну спроможність екстрактивних компонентів кісточок на поверхні іржі [7]. Після обробки прокородованої поверхні екстрактами реєструється велика кількість Карбону та інших атомів (Сульфур, Нітроген та ін.), притаманних тільки екстрактам. Доказом «перетворюючої» дії кісточкової сировини по відношенню до продуктів атмосферної корозії є результати розрахунку (за даними оже-спектрометрії) співвідношення атомів Оксигена і Ферума іржі після обробки їх водними екстрактами (рис.4).

Одержані дані свідчать про те, що обробка екстрактами значно змінює співвідношення основних компонентів продуктів атмосферної корозії. У необробленому шарі іржі основну масу хімічних елементів складають Карбон, Оксиген і Ферум. При цьому співвідношення Ферума до Оксигену відповідає 0,68, що стехіометрично відповідає оксиду Fe_2O_3. Якщо ж проаналізувати це співвідношення для іржі, обробленої водними екстрактами, то його величина збільшується. Тобто частка атомів Ферума в окисленому шарі підвищується, а кількість Оксигену – знижується [7].

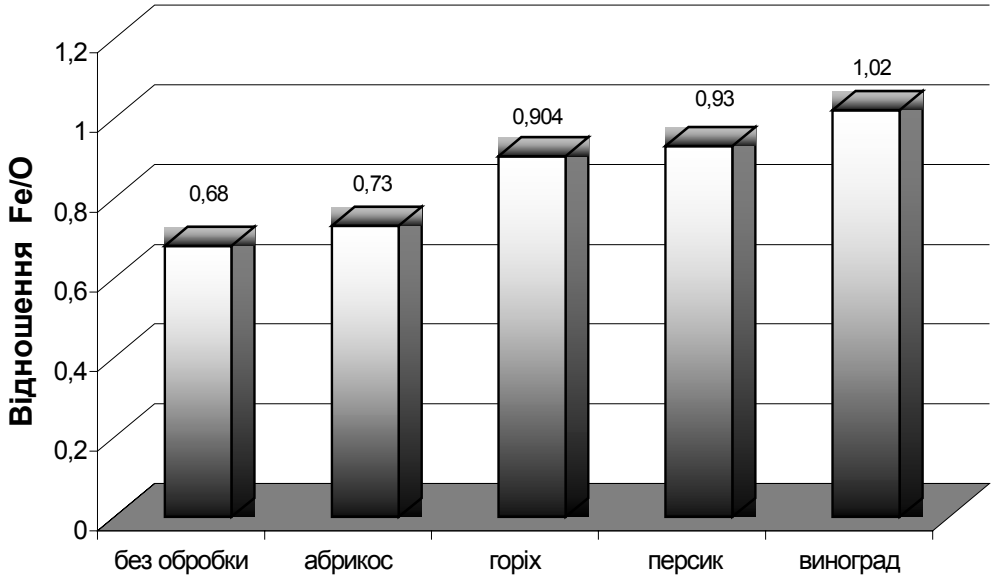


Рисунок 4 - Вплив обробки екстрактами на співвідношення атомів Феруму і Оксигену в поверхневому шарі металу з продуктами корозії

Ймовірно, зміна рівня окисненості іржі відбувається за рахунок декількох факторів. По-перше, при взаємодії з низькомолекулярними органічними кислотами оксиди Ферума розчиняються з утворенням водорозчинних солей, а вивільнені катіони Ферума приймають участь в утворенні інших речовин. Тобто, в шарі іржі стає менше оксидів і більше інертних сполук Ферума. По-друге, адсорбція високомолекулярних речовин та утворен-

 ISSN 1991-7848

ня великої кількості координаційних сполук призводить до значного підвищення кількості Карбону в поверхневих шарах і зміні питомої кількості Ферума. Отже, дані зміни співвідношення основних компонентів (рис.4) підтверджують значний вплив екстрактивних речовин на іржу, який виявляється в зниженні її окисненості.

З приведених даних видно, що обробка екстрактами з кісточкового порошку винограду призводить до максимального збільшення величини відношення кількостей атомів Ферума до Оксигену. Це цілком вірогідно з урахуванням складу екстракту виноградної кісточки, який, як вказано раніше, містить максимальну кількість низькомолекулярних кислот, що травлять продукти корозії.

Таким чином, дослідження фізико-хімічних процесів при дії на іржу водних екстрактів кісточкових порошків показали, що присутні в них компоненти є хімічно-активними по відношенню до продуктів атмосферної корозії.

«Модифікуючий» вплив кісточкової сировини на продукти атмосферної корозії

Крім часткового розчинення продуктів атмосферної корозії (головним чином, лепідокрокіту), перетворювачі іржі повинні володіти здатністю до утворення хімічно стабільних сполук. В традиційних рецептурах перетворювачів ця проблема вирішується шляхом введення різного роду речовин, які здатні реагувати з катіонами Феруму і утворювати нерозчинні, як правило, комплексні сполуки.

Особливістю кісточкової сировини є той факт, що вона вже містить ряд природних сполук, які мають саме ці властивості. До них можна віднести сполуки широкого класу фенолів, а саме пірокатехін і його похідні.

Власними дослідженнями методами спектрометрії в видимому діапазоні, а також ІЧ-спектроскопією на модельних сполуках, представниках основних класів речовин кісточкової сировини, показано, що пірокатехін (наряду з жирними кислотами) є другою хімічно активною складовою екстрактивної частини кісточкової сировини, здатною до утворення комплексних сполук (хелатів) ферума. Слід відмітити, що жирні кислоти теж мають здатність до координування йонів металу, але в нашому випадку ця їх властивість не є визначальною.

Враховуючи широкий клас сполук, що містяться у водних екстрактах, можлива поява різних по будові комплексних хелатних сполук. При цьому особливістю таких комплексів є здатність гідроксильних груп (ОН) фенолів, що знаходяться у бензольного кільця в ортоположенні, координувати катіони Ферума з утворенням нерозчинних сполук. В загальному вигляді взаємодію катіонів Ферума з фенольними сполуками можна представити реакцією:

$$3RO^- + Fe^{3+} \rightarrow Fe(RO)_3\downarrow, \text{ де } R : Ar$$

В кислому середовищі, яке формується за рахунок наявності в екстрактах жирних кислот, утворюється пірокатехіновий комплекс Феруму фіолетового забарвлення (рис.5) [6].

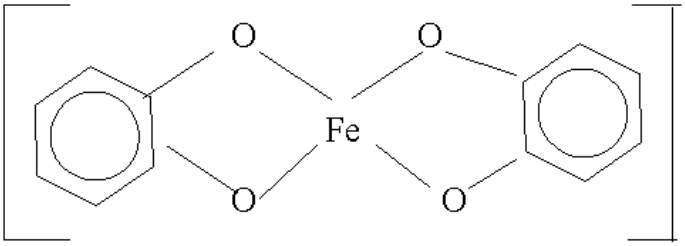


Рисунок 5 - Схема комплексу пірокатехіну із Ферумом при pH =4,25 [6]

Спектрометрією в видимому діапазоні була підтверджена зміна кольору іржі з червоного на пурпурний, який є результатом накладення на іржу кольору комплексної сполуки. В той же час, ні одна із речовин, представників основних класів сполук екстрактів, не давала такої зміни забарвлення продуктів корозії.

Проведеними власними дослідженнями був достовірно доказаний «модифікуючий» вплив кісточкових екстрактів по відношенню до іржі, який полягає у зв’язуванні вільних катіонів Феруму в комплексні хелатні сполуки, наявність яких дозволяє підвищити стабільність шару іржі під лакофарбовою плівкою.

Висновки

Для захисту прокородованих металевих поверхонь слід використовувати тільки лакофарбові покриття, які містять цільові добавки з властивостями виняткового впливу на іржу.

Для ефективного протикорозійного впливу на продукти корозії металу необхідно забезпечити їх «перетворення» та «модифікування». Термін «перетворення» включає зниження окисненості шару іржі за рахунок розчинення її складових з низькою стабільністю. «Модифікація» іржі передбачає утворення нерозчинних комплексних сполук на основі катіонів Феруму, звільнених при розчиненні продуктів атмосферної корозії.

Ефективним рішенням проблеми захисту прокородованої поверхні є використання кісточкових відходів фруктів, ягід та горіхів в якості основи для виготовлення антикорозійного наповнювача для покриттів такого типу.

ЛІТЕРАТУРА

1. Розенфельд И.Л., Рубинштейн Ф.И. Защита металлов от коррозии лакокрасочными покрытиями. – М.: Химия, 1987. – 224 с.
2. Агафонов Г.И., Яковлев А.Д., Ицко Э.Ф., Кузнецов В.С. Повышение защитной способности лакокрасочных покрытий // Лакокрасочные материалы и их применение. – 2000. – № 1. – С. 21-24.
3. Кукурс О.К. Комплексные покрытия для защиты от коррозии в атмосферных условиях: Обзор. – Рига: ЛатНИИНТИ, 1987. – 40 с.

 ISSN 1991-7848

4. Чигиринец Е.Э., Липатов С.Ю. Исследование ингибирующих свойств водных экстрактов косточковых препаратов // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 2003.– №6.– С.38-41.
5. Чигиринец Е.Э. Механизм антикоррозионного действия новых порошковых преобразователей ржавчины // Проблеми корозії та протикорозійного захисту матеріалів”: В 2-х томах /Спецвипуск журналу “Фізико-хімічна механіка матеріалів. – №4. – Львів: Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, 2004. – С.826-831.
6. Запрометов М.Н. Биохимия катехинов (биосинтез, превращение и практическое использование). – М.: Наука. – 1964.– 296 с.
7. Чигиринец Е.Э., Мищук. О.А., Стовпченко А.П. Изучение состава поверхности металла, обработанной водными экстрактами косточковых препаратов, методом оже-спектроскопии // Экотехнологии и ресурсосбережение.– 2004.– №5.– С. 26-30.

II ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МЕТАЛЛУРГИИ

ISSN 1991-7848

УДК 004.942:681.518.25

А.И. Михалев, Н.В. Лысая, Д.А. Лысый

ПОИСК КОМПРОМИССА ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧИ НЕЧЕТКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ВЫПЛАВКИ МАРГАНЦЕВЫХ ФЕРРОСПЛАВОВ

Пропонується математична модель для рішення задачі оптимізації складу багатокомпонентної шихти по критерію мінімальної вартості в нечіткій постановці, коли параметри процесу задаються у вигляді інтервалів та описуються функцією приналежності. Проведене оцінювання технологічних параметрів процесу виплавки марганцевих феросплавів при різних видах експертних оцінок початкових даних процесу.

Рассмотрена задача формирования многокомпонентной шихты оптимального состава по критерию минимальной стоимости при получении ферросплавов заданного состава в нечеткой постановке (параметры процесса задаются в виде интервалов и описываются функциями принадлежности). Проведено оценивание технологических параметров процесса выплавки марганцевых ферросплавов при разных видах экспертных оценок исходных данных.

The problem of optimum composition (to the measure of minimum cost) the parts of multicomponent ferro-alloy charge in the preset chemical boundaries is considered. The algorithm for solving the problem with the parameters of process set as intervals and described by the membership functions is proposed. Evaluation of technological parameters of manganese ferro-alloys smelting process with the different types of expert estimation is conducted.

Поиск новых подходов и совершенствование известных методов оптимизации технологических параметров производства марганцевых ферросплавов являются весьма актуальными задачами. Используемые при этом расчетные методы оптимизации и проводимые исследования процессов должны позволять косвенно определять оптимальные параметры производства ферросплавов, в частности, силикомарганца и ферромарганца [2]. От корректности постановки и точности решения задачи оптимизации в значительной степени зависят расходные показатели процессов получения ферросплавов, качество получаемого продукта.

В то же время рассматриваемые процессы характеризуются априорной и текущей неопределенностью. Априорная неопределенность имеет место в основном из-за невозможности точно определить начальный химический состав компонентов шихты, их извлечение в сплав, а также неточного представления некоторых взаимосвязанных технологических параметров. Как правило, имеются лишь замеры этих параметров в отдельных точках, значения которых могут меняться из-за неоднородности среды. Применение средних и средневзвешенных значений параметров для расчетов может приводить к получению значительно смещенных точечных оценок параметров [1]. Ввиду этого более эффективным подходом является представление имеющейся априорной информации на едином формальном

© МИХАЛЕВ А.И., ЛЫСАЯ Н.В., ЛЫСЫЙ Д.А., 2006

языке теории нечетких множеств с представлением характеристик взвешивания неточно заданных величин функциями принадлежности [1].

В свою очередь, следует отметить, что интерпретация неопределенных величин как нечетких больше соответствует реальным условиям производства по сравнению с интерпретацией этих величин как детерминированных, либо случайных [4].

Целью работы является поиск компромисса при решении задачи оптимизации параметров выплавки марганцевых ферросплавов в нечеткой постановке (параметры процесса задаются в виде интервалов и описываются функциями принадлежности).

Постановка задачи. Рассмотрим задачу формирования многокомпонентной шихты оптимального состава по критерию ее минимальной стоимости при получении ферросплавов (ферромарганец, силикомарганец, ферросилиций) заданного состава (ДСТУ 3547-97) углеродотермическим процессом в условиях неопределенности при задании исходных параметров процесса. Для решения задач подобного рода в условиях нечеткого задания исходных данных в последнее время успешно применяются методы принятия решений на основе нечеткой логики и интервальных оценок [1, 4].

При постановке задачи выделим величины, которые заданы нечетко.

Ограничения на процентное содержание химических элементов (E_i) в сплаве (силикомарганец, ферромарганец) имеют вид:

$$\underline{E}_i \le E_i \le \overline{E}_i, i = \overline{1, M}, \tag{1}$$

где $\underline{E}_i, \overline{E}_i$ - соответственно нижний и верхний пределы содержания *i*-го химического элемента в сплаве, M – количество химических элементов, на содержание которых в сплаве накладываются ограничения.

Обозначим нечеткую величину, определяющую долевое содержание каждого из компонентов в шихте через $\tilde{X}_j$, $j = \overline{1, N}$, где N – количество возможных компонентов шихты.

Согласно физическому смыслу задачи переменные $\tilde{X}_j$ не могут быть отрицательными. Кроме того, должно обеспечиваться естественное условие

$$\sum_{j=1}^{N} \tilde{X}_j = 1, \tag{2}$$

что соответствует одновременной справедливости двух неравенств:

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^{N} \tilde{X}_j &\le 1, \\ \sum_{j=1}^{N} \tilde{X}_j &\ge 1. \end{aligned} \tag{3}$$

С учетом имеющихся ограничений на процентное содержание химических элементов в конечном сплаве, при M=10 имеем [2]:

 ISSN 1991-7848

$$
\begin{aligned}
Y_1 &= \overline{E}_1 - \tilde{E}_{11}\tilde{X}_1 - \tilde{E}_{12}\tilde{X}_2 - \ldots - \tilde{E}_{1N}\tilde{X}_N \geq 0,\\
Y_2 &= -\underline{E}_1 + \tilde{E}_{11}\tilde{X}_1 + \tilde{E}_{12}\tilde{X}_2 + \ldots + \tilde{E}_{1N}\tilde{X}_N \geq 0,\\
Y_3 &= \overline{E}_2 - \tilde{E}_{21}\tilde{X}_1 - \tilde{E}_{22}\tilde{X}_2 - \ldots - \tilde{E}_{2N}\tilde{X}_N \geq 0,\\
Y_4 &= -\underline{E}_2 + \tilde{E}_{21}\tilde{X}_1 + \tilde{E}_{22}\tilde{X}_2 + \ldots + \tilde{E}_{2N}\tilde{X}_N \geq 0,\\
Y_5 &= \overline{E}_3 - \tilde{E}_{31}\tilde{X}_1 - \tilde{E}_{32}\tilde{X}_2 - \ldots - \tilde{E}_{3N}\tilde{X}_N \geq 0,\\
Y_6 &= -\underline{E}_3 + \tilde{E}_{31}\tilde{X}_1 + \tilde{E}_{32}\tilde{X}_2 + \ldots + \tilde{E}_{3N}\tilde{X}_N \geq 0,\\
Y_7 &= \overline{E}_4 - \tilde{E}_{41}\tilde{X}_1 - \tilde{E}_{42}\tilde{X}_2 - \ldots - \tilde{E}_{4N}\tilde{X}_N \geq 0,\\
Y_8 &= -\underline{E}_4 + \tilde{E}_{41}\tilde{X}_1 + \tilde{E}_{42}\tilde{X}_2 + \ldots + \tilde{E}_{4N}\tilde{X}_N \geq 0,\\
Y_9 &= 1 - \tilde{X}_1 - \tilde{X}_2 - \ldots - \tilde{X}_N \geq 0,\\
Y_{10} &= -1 + \tilde{X}_1 + \tilde{X}_2 + \ldots + \tilde{X}_N \geq 0,
\end{aligned}
\qquad (4)
$$

где $\tilde{E}_{ij}$, $j = \overline{1,N}$, $i = \overline{1,M}$ - нечеткие заданные значения содержания химических элементов в компонентах шихты.

В случае наложения ограничений на долевые содержания компонентов в шихте вида:

$$\underline{X_j} \leq \tilde{X}_j \leq \overline{X_j}\,,\ \overline{j = 1,n}\,, \qquad (5)$$

n – количество накладываемых ограничений, к системе уравнений (4) добавляются $n*2$ неравенств вида:

$$
\begin{aligned}
Y_{1k} &= X_k - \tilde{X}_1 - \tilde{X}_2 - \ldots - \tilde{X}_N \geq 0,\\
Y_{1k+1} &= -\bar{X}_k + \tilde{X}_1 + \tilde{X}_2 + \ldots + \tilde{X}_N \geq 0,
\end{aligned}
\qquad (6)
$$

$k = \overline{1, n*2}$.

Система (4), (6) избыточна, поскольку количество неизвестных ($\tilde{X}_1, \tilde{X}_2, \ldots, \tilde{X}_N, Y_1, Y_2, \ldots, Y_{10+k*2}$) превышает количество уравнений, поэтому, исходя из предположения о допустимости ее решения, система может иметь бесчисленное количество решений [2, 5].

Задача состоит в нахождении неотрицательных допустимых решений, минимизирующих функцию цели:

$$Y_0 = \sum_{j=1}^{N} C_j \tilde{X}_j \rightarrow \min\,, \qquad (7)$$

где C_j – стоимость j-го компонента шихты.

Введение компромисса. Поскольку при получении металлического сплава используются компоненты шихты, в которых ограниченные элементы сплава находятся в виде оксидов, то для выполнения условий допустимости решения принимается компромисс, состоящий в том, что в

приведенные уравнения вместо долей оксидных компонентов $\tilde{X}_j$ подставляются их эквиваленты $\tilde{Z}_j$, выраженные через выход металлической части из каждой составляющей шихты. Выход металлической части – коэффициента k_j, $j=\overline{1,N}$, (в долях) из оксидного компонента вычисляется с учетом степени перехода в металл фосфора, марганца, кремния и железа. Выражение для вычисления усредненного значения коэффициента k_j^* имеет вид:

$$k_j^* = \frac{\sum_{i=1}^{M} E_{ij}^* \cdot \eta_{ij}^*(E_i)}{B}, \quad j=\overline{1,N}, \tag{8}$$

где $E_{ij}^*, \eta_{ij}^*(E_i)$ - усредненные значения соответственно содержания *i*-го химического элемента и его извлечения в сплав в *j*–м компоненте шихты; *B* - коэффициент, учитывающий дополнительный переход в металл железа, углерода, кремния, кальция и алюминия из золы кокса, электродной массы и электродного кожуха.

Учитывая, что химический состав компонентов шихты и степень перехода их в сплав являются нечетко заданными величинами, соответственно и коэффициент выхода металлической части из оксидных компонентов также будет являться нечетко определенным параметром, зависящим от нечетко заданных величин $\tilde{E}_{ij}$ и $\tilde{\eta}_{ij}(E_i)$ и будет определяться выражением:

$$\tilde{k}_j = \frac{\sum_{i=1}^{M} \tilde{E}_{ij} \cdot \tilde{\eta}_{ij}(E_i)}{B}, \quad j=\overline{1,N}. \tag{9}$$

С учетом (9) содержание элементов в металлической составляющей *i*–го компонента будет определяться нечеткой величиной

$$\frac{\tilde{E}_{ij} \cdot \tilde{\eta}_{ij}(E_i)}{\tilde{k}_j}. \tag{10}$$

Тогда с учетом (10) балансовые уравнения (4) примут следующий общий вид:

 ISSN 1991-7848

$$
\begin{aligned}
Y_1 &= \overline{E}_1 - \frac{\tilde{E}_{11}\cdot\tilde{\eta}_{11}(E_1)}{\tilde{k}_1}\tilde{Z}_1 - \frac{\tilde{E}_{12}\cdot\tilde{\eta}_{12}(E_1)}{\tilde{k}_2}\tilde{Z}_2 - \ldots - \frac{\tilde{E}_{1N}\cdot\tilde{\eta}_{1N}(E_1)}{\tilde{k}_N}\tilde{Z}_N \geq 0,\\
Y_2 &= -\underline{E}_1 + \frac{\tilde{E}_{11}\cdot\tilde{\eta}_{11}(E_1)}{\tilde{k}_1}\tilde{Z}_1 + \frac{\tilde{E}_{12}\cdot\tilde{\eta}_{12}(E_1)}{\tilde{k}_2}\tilde{Z}_2 + \ldots + \frac{\tilde{E}_{1N}\cdot\tilde{\eta}_{1N}(E_1)}{\tilde{k}_N}\tilde{Z}_N \geq 0,\\
Y_3 &= \overline{E}_2 - \frac{\tilde{E}_{21}\cdot\tilde{\eta}_{21}(E_2)}{\tilde{k}_1}\tilde{Z}_1 - \frac{\tilde{E}_{22}\cdot\tilde{\eta}_{22}(E_2)}{\tilde{k}_2}\tilde{Z}_2 - \ldots - \frac{\tilde{E}_{2N}\cdot\tilde{\eta}_{2N}(E_2)}{\tilde{k}_N}\tilde{Z}_N \geq 0,\\
Y_4 &= -\underline{E}_2 + \frac{\tilde{E}_{21}\cdot\tilde{\eta}_{21}(E_2)}{\tilde{k}_1}\tilde{Z}_1 + \frac{\tilde{E}_{22}\cdot\tilde{\eta}_{22}(E_2)}{\tilde{k}_2}\tilde{Z}_2 + \ldots + \frac{\tilde{E}_{2N}\cdot\tilde{\eta}_{2N}(E_2)}{\tilde{k}_N}\tilde{Z}_N \geq 0,\\
Y_5 &= \overline{E}_3 - \frac{\tilde{E}_{31}\cdot\tilde{\eta}_{31}(E_3)}{\tilde{k}_1}\tilde{Z}_1 - \frac{\tilde{E}_{32}\cdot\tilde{\eta}_{32}(E_3)}{\tilde{k}_2}\tilde{Z}_2 - \ldots - \frac{\tilde{E}_{3N}\cdot\tilde{\eta}_{3N}(E_3)}{\tilde{k}_N}\tilde{Z}_N \geq 0,\\
Y_6 &= -\underline{E}_3 + \frac{\tilde{E}_{31}\cdot\tilde{\eta}_{31}(E_3)}{\tilde{k}_1}\tilde{Z}_1 + \frac{\tilde{E}_{32}\cdot\tilde{\eta}_{32}(E_3)}{\tilde{k}_2}\tilde{Z}_2 + \ldots + \frac{\tilde{E}_{3N}\cdot\tilde{\eta}_{3N}(E_3)}{\tilde{k}_N}\tilde{Z}_N \geq 0,\\
Y_7 &= \overline{E}_4 - \frac{\tilde{E}_{41}\cdot\tilde{\eta}_{41}(E_4)}{\tilde{k}_1}\tilde{Z}_1 - \frac{\tilde{E}_{42}\cdot\tilde{\eta}_{42}(E_4)}{\tilde{k}_2}\tilde{Z}_2 - \ldots - \frac{\tilde{E}_{4N}\cdot\tilde{\eta}_{4N}(E_4)}{\tilde{k}_N}\tilde{Z}_N \geq 0,\\
Y_8 &= -\underline{E}_4 + \frac{\tilde{E}_{41}\cdot\tilde{\eta}_{41}(E_4)}{\tilde{k}_1}\tilde{Z}_1 + \frac{\tilde{E}_{42}\cdot\tilde{\eta}_{42}(E_4)}{\tilde{k}_2}\tilde{Z}_2 + \ldots + \frac{\tilde{E}_{4N}\cdot\tilde{\eta}_{4N}(E_4)}{\tilde{k}_N}\tilde{Z}_N \geq 0,
\end{aligned}
\qquad (11)
$$

Условие (2) преобразуется к виду:

$$\sum_{j=1}^{N}\tilde{Z}_j = 1, \qquad (12)$$

где $\tilde{Z}_j$ - нечеткая величина, определяющая долю металла, перешедшего в конечный сплав соответственно из оптимального количества *i*-го компонента шихты.

Функция цели (7) примет вид:

$$Y_0 = \sum_{j=1}^{N}\frac{C_j}{\tilde{k}_j}\tilde{Z}_j \to \min. \qquad (13)$$

Определив $\tilde{Z}_j$, перейдем к оксидным компонентам шихты. При этом нечеткие величины долей оксидных компонентов определятся соотношением:

$$\tilde{X}_j = \frac{\tilde{Z}_j}{\tilde{k}_j\sum_{j=1}^{N}\tilde{Z}_j\tilde{k}_j},\ j=\overline{1,N}. \qquad (14)$$

Пусть химический состав исходных компонентов шихты определяется таблицей 1, в качестве химических элементов, на которые накладываются ограничения, для силикомарганца выступают *P, Mn, Si, Fe*, процентное содержание которых (согласно ГОСТ 4756-77, изм. от 1.01.1990 г.) в

полученном силикомарганце определяется соответственно интервалами: [0,05 0,7], [65 75], [15 20], [3 20]. Доли перехода восстановленных элементов из шихты в сплав имеют следующие ограничения:

$$\eta_{1\min}(P)=0{,}88,\ \eta_1^*(P)=0{,}9,\ \eta_{1\max}(P)=0{,}92;$$
$$\eta_{2\min}(Mn)=0{,}79,\ \eta_2^*(Mn)=0{,}8,\ \eta_{2\max}(Mn)=0{,}82; \qquad (15)$$
$$\eta_{3\min}(Si)=0{,}39,\ \eta_3^*(Si)=0{,}4,\ \eta_{3\max}(Si)=0{,}41;$$
$$\eta_{4\min}(Fe)=0{,}95,\ \eta_4^*(Fe)=0{,}95,\ \eta_{4\max}(Fe)=0{,}95.$$

Таблица 1

Химический состав и стоимость исходных компонентов шихты для выплавки силикомарганца

	Компонент шихты	$P(\underline{E}_1)$	$Mn(\underline{E}_2)$	$Si(\underline{E}_3)$	$Fe(\underline{E}_4)$
1	МФШ	[0,015 0,019]	[40,1 40,9]	[13,4 14,2]	[0,16 0,24]
2	АМнВ-2	[0,2 0,26]	[39,7 39,9]	[11,0 11,8]	[2,5 2,7]
3	Кварцит	[0,0 0,0]	[0,0 0,0]	[44,1 44,5]	[0,0 0,0]
4	АМнВ-1	[0,2 0,26]	[47,0 47,8]	[8,9 9,7]	[2,2 2,4]
5	БАФ	[0,16 0,22]	[42,0 42,8]	[12,2 12,8]	[1,5 1,7]
6	АМнШ	[0,07 0,13]	[37,5 38,5]	[12,6 13,4]	[2,4 2,6]

Оценивание параметров модели. В отличие от существующей практики предварительного получения точечных оценок для каждого параметра на основе различных способов усреднения, в предлагаемом подходе каждый из них задается в виде соответствующей функции принадлежности $\mu_{ij}(\tilde{E}_{ij}), \mu_{ij}(\tilde{\eta}_{ij}), \overline{i=1,M}, \overline{j=1,N}$.

Предположим, что имеется два вида экспертных оценок: согласно первой, так как нечетко заданные величины определены интервалами $[\underline{E}_{ij}, \overline{E}_{ij}]$, $[\underline{\eta}_{ij}, \overline{\eta}_{ij}]$ и при этом известны наиболее допустимые их значения E_{ij}^*, η_{ij}^*, то наиболее простой аппроксимацией будет линейная и такие параметры удобнее всего характеризовать треугольной функцией принадлежности:

$$\begin{aligned}
&\mu(x)=0, && \text{если } x>r,\\
&\mu(x)=\frac{x-l}{c-l}, && \text{если } l\le x\le c,\\
&\mu(x)=\frac{r-x}{r-c}, && \text{если c}\le x\le r,\\
&\mu(x)=0, && \text{если } x<l.
\end{aligned} \qquad (16)$$

x – параметр модели, для которого определяется функция принадлежности, l, c, r - соответственно левая граница треугольника, центр треугольника и его правая граница;

пусть, согласно второй оценке, входные величины описываются колоколообразной функцией принадлежности (17), с параметром K,

 ISSN 1991-7848

определяющим в (18) ширину функции принадлежности равным 0,15, согласно второй экспертной оценке, данные описываются той же функцией принадлежности (17), а параметр K принимается равным 0.3.

$$\mu(x)=\frac{1}{1+\left[\left(\frac{x-b}{c}\right)^2\right]^a}, \qquad (17)$$

где b, c - соответственно ширина и центр функции принадлежности;

параметр a примем равным 1;

ширина функции принадлежности задается выражением:

$$c=K(\overline{x}-\underline{x}),\ K>0, \qquad (18)$$

где $\overline{x},\underline{x}$ - соответственно верхняя и нижняя границы интервала [3].

Центр функции принадлежности b входной величины определяется как наиболее допустимое значение этой входной величины:

$$b=\frac{\overline{x}+\underline{x}}{2},\ \mu(b)=1. \qquad (19)$$

Результирующие функции принадлежности находятся с использованием численного метода [1]. Все функции $\mu(\tilde{E}_{ij}),\ \mu(\tilde{\eta}_E),\ \overline{i=1,M},\ \overline{j=1,N}$ достигают значения 1, поэтому отрезок [0, 1] разбивается на α–уровни [13, 71]. Выделим следующие значения α–уровней: $\alpha_1=0$, $\alpha_2=0,3$, $\alpha_3=0,5$, $\alpha_4=0,8$, $\alpha_5=0,9$, $\alpha_6=1$. Хотя при задании треугольной функции принадлежности можно ограничиться значениями уровней $\alpha_1=0$, $\alpha_2=0,5$, $\alpha_3=1$, введение дополнительных α–уровней производится для возможности сравнения результатов, полученных по различным экспертным оценкам. После подстановки данных в качестве входных параметров в балансовые уравнения (4), (6), и решения уравнений получаем α–уровни функций принадлежности оптимального решения. Результаты расчета оптимального состава шихты, полученные при задании входных нечетких величин с использованием треугольной и колоколообразной функции принадлежности приведены в таблице 2.

Таблица 2

Рассчитанные –уровневые множества для функций принадлежности оптимального решения. Долевые части компонентов шихты

α	Треугольная	Колоколообразная, $K=0.15$	Колоколообразная, $K=0.3$
0	[0,254 0,236]	[0,254 0,236]	[0,264 0,228]
0,3	[0,252 0,238]	[0,25 0,241]	[0,255 0,236]
0,5	[0,25 0,24]	[0,248 0,242]	[0,251 0,239]
0,8	[0,247 0,243]	[0,247 0,244]	[0,248 0,242]
0,9	[0,246 0,244]	[0,246 0,244]	[0,247 0,243]
1	0,245	0,245	0,245

График функций принадлежности нечеткой выходной величины – долевой части шихты оптимального по стоимости состава, полученной на основе различных видов экспертных оценок, приведен на рис. 1.

Содержание химических элементов $\tilde{E}_i$, $i=\overline{1,M}$ в сплаве оптимального состава определяется следующими соотношениями:

$$\tilde{E}_i = \frac{\sum_{j=1}^{N} G\tilde{X}_j \cdot \tilde{E}_{ij} \cdot \tilde{\eta}_{ij}(\tilde{E}_i)}{1000},\ i=\overline{1,M}, \qquad (20)$$

где $G\tilde{X}_j$ - расход шихтовых компонентов (в кг) на 1 натуральную тонну сплава [4].

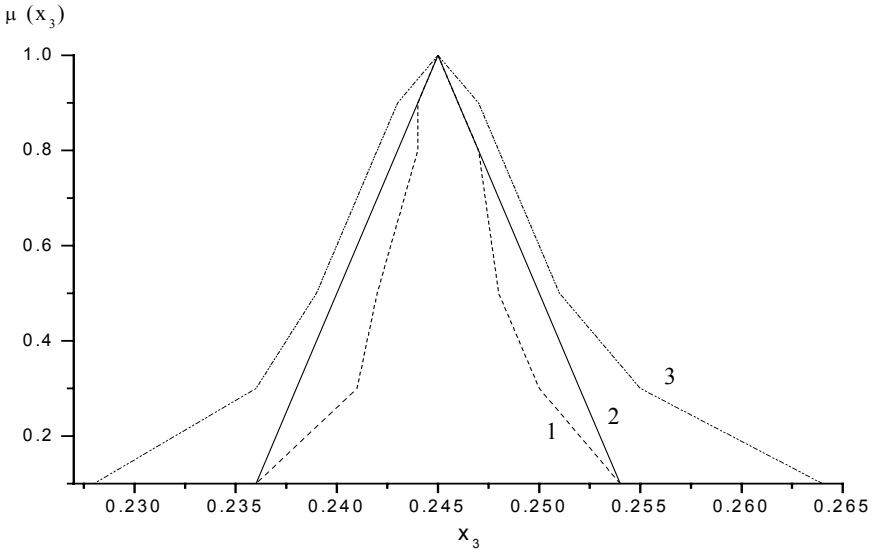


Рисунок 1 - Функции принадлежности $\mu(\tilde{x}_3)$ долевой части компонента шихты кварцита при различных видах экспертных оценок входных переменных: 1, 3 – колоколообразная функция принадлежности вида при K равным соответственно 0.15 и 0.3; 2 – треугольная функция принадлежности

Проведя расчет расходных компонентов шихты по выражению (20), получаем α–уровни функции принадлежности содержания химических элементов в сплаве оптимального состава.

Таблица 3

Рассчитанные α–уровневые множества для функций принадлежности оптимального решения. Химический состав сплава

α	Треугольная	Колоколообразная, $K=0.15$	Колоколообразная, $K=0.3$
α	$\sigma_\alpha(P)$	$\sigma_\alpha(P)$	$\sigma_\alpha(P)$
0	[0,365 0,39]	[0,365 0,39]	[0,351 0,4]
0,3	[0,367 0,387]	[[0,371 0,384]	[[0,364 0,39]
0,5	[0,37 0,384]	[0,373 0,381]	[0,369 0,386]
0,8	[0,375 0,38]	[0,375 0,38]	[0,373 0,382]
0,9	[0,376 0,379]	[0,376 0,379]	[0,375 0,38]
1	0,377	0,377	0,377

 ISSN 1991-7848

Заключение. Использование методов нечеткого вывода при решении задачи формирования многокомпонентной шихты оптимального состава дает возможность получать устойчивое решение в условиях неопределенности информации о параметрах процесса, а также при различных видах экспертных оценок исходных данных.

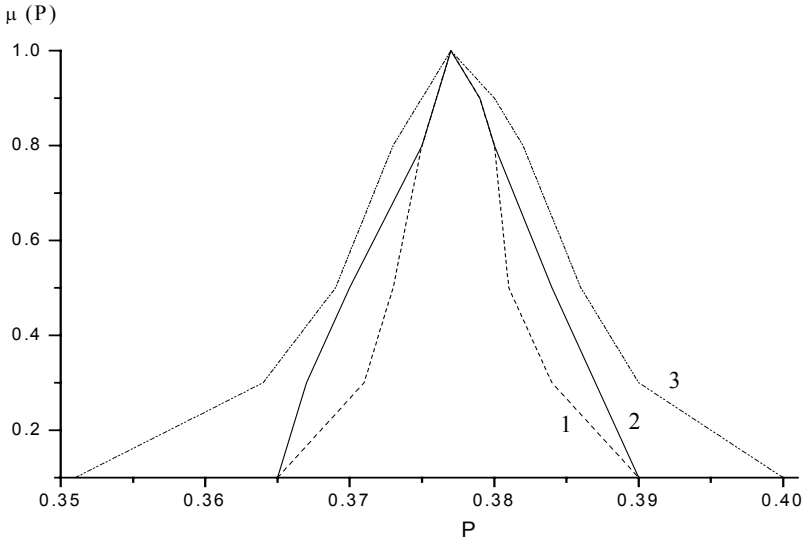


Рисунок 2 - Функции принадлежности содержания фосфора $\mu(P)$ в сплаве оптимального состава при различных видах экспертных оценок

ЛИТЕРАТУРА

1. Алтунин А.Е., Семухин М.В. Модели и алгоритмы принятия решений в нечетких условиях// Монография. - Тюмень: изд-во Тюменского госуниверситета, 2000. - 295 с.
2. Гасик М.И., Гладких В.А., Михалев А.И., Лысая Н.В. и др. Оптимизация состава многокомпонентной шихты углеродовосстановительной плавки ферросплавов // Электрометаллургия. – 1999. - №3. – С. 35-40.
3. Колодяжный В.В. Алгоритм самоорганизации нечеткой системы Сугено // 7-я Международная конференция “Теория и техника передачи, приема и обработки информации ”: Сб. науч.трудов. – Харьков: ХТУРЭ, 2001. – С. 406-407.
4. Михалев А.И., Гладких В.А., Лысая Н.В., Лысенко В.Ф. Оптимизация состава многокомпонентной шихты при выплавке ферросплавов в условиях нечеткого задания исходных данных //Сучасні проблеми металургії. Наукові праці Нац. метал. академії України. - Том 6. - 2003. - С. 183 - 185.
5. Хазан Г.Л. Поиск компромиссов при расчете оптимальной многокомпонентной шихты для металлургического расплава.// Расплавы. 1994. №1. С.67-72.

УДК 004.94 + 519.63

Т.В. Михайловская, А.И. Михалев

ТРЕХМЕРНАЯ КЛЕТОЧНО-АВТОМАТНАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ЗАТВЕРДЕВАНИЯ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Розглянуто клітинно-автоматний підхід для моделювання процесу твердіння металів і сплавів. Досліджено термодинамічні основи формування правил переходу для роботи клітинних автоматів, що моделюють механізм твердіння металів і сплавів. Показано ефективність застосування клітинно-автоматної моделі для розглянутого класу задач із урахуванням нелінійної залежності теплофізичних параметрів процесу від температури, а також в умовах розподіленого виділення прихованої теплоти плавлення в температурному інтервалі кристалізації.

Рассмотрен клеточно-автоматный подход для моделирования процесса затвердевания металлов и сплавов. Исследованы термодинамические основы формирования правил перехода для работы клеточных автоматов, моделирующих механизм затвердевания металлов и сплавов. Показана эффективность применения клеточно-автоматной модели для рассмотренного класса задач с учетом нелинейной зависимости теплофизических параметров процесса от температуры, а также в условиях распределенного выделения скрытой теплоты плавления в температурном интервале кристаллизации.

The cellular-automatic approach for modeling process of hardening of metals and alloys is considered. Thermodynamic background of the cellular automats transition rules formation for modeling the mechanism of metals and alloys hardening are researched. Efficiency of application of cellular-automatic model for the considered class of problems in view of nonlinear dependence of process parameters from temperature, and also in conditions of the distributed allocation of the fusion latent heat in a temperature interval of crystallization is shown.

Как известно, процесс математического моделирования характеризуется выполнением следующих этапов [1]: математическая формализация изучаемого процесса, выбор численного метода решения поставленной задачи, проведение вычислительного эксперимента, анализ состоятельности предложенной модели.

Введение

При традиционном подходе к моделированию процесса затвердевания для математического описания, как правило, используют дифференциальные уравнения в частных производных. В то же время формализация реальных задач приводит к трудно разрешимым, а зачастую и неразрешимым аналитически дифференциальным уравнениям в частных производных. Это требует получения их численного решения, которое при большой размерности задачи сходится медленно или имеет громоздкий в вычислительном плане алгоритм [1, 2, 3]. Для преодоления упомянутых выше трудностей используют следующие два подхода: совершенствование численных методов решения дифференциальных уравнений в частных

© МИХАЙЛОВСКАЯ Т.В., МИХАЛЕВ А.И., 2006

 ISSN 1991-7848

производных и поиск качественно новых моделей основанных на иных подходах. При синтезе новых моделей полагаются на природные свойства объекта исследования, т.е. в основу модели закладывается принцип близкодействия и другие физические законы, которые позволяют приблизить свойства моделируемых объектов к физическим свойствам природных объектов и легко интерпретировать модельные результаты.

Одним из концептуально новых классов прикладных моделей, предназначенных для описания пространственно-временных систем, являются клеточные автоматы. Основоположниками идеи клеточных автоматов являются К. Цузе и Дж. фон Нейман, предложившие в 40-х годах прошлого столетия парадигму вычислительного пространства и реализацию на ее основе развития самовоспроизводящихся систем.

С помощью клеточных автоматов построены концептуальные и прикладные модели динамических систем с распределенными параметрами, применяемых для моделирования самых разных физических процессов, таких как пространственная диффузия, газо- и гидродинамика, нелинейные химические системы, рост ветвящихся кристаллов, фазовые переходы, обработка изображений и распознавание образов, распространение эпидемий и многое другое [4].

В данной работе рассмотрены основные положения клеточно-автоматной модели процесса кристаллизации металлов и сплавов.

Затвердевание металла представляет собой сложный физико-химический процесс, при котором формируются большинство важнейших структурно-механических свойств отливки. Процесс затвердевания металлов и сплавов обусловлен отводом теплоты от расплава в форму и окружающую среду [5].

При моделировании процесса затвердевания необходимо опираться на закон сохранения массы и уравнения состояния, которые позволяют корректно учесть нелинейность термодинамических свойств металла – плотность, теплоемкость, теплопроводность зависят от температуры, а так же наличие скрытой теплоты кристаллизации, распределенной в интервале температур ликвидус-солидус.

Процесс теплопереноса описывается законом Фурье [5]

$$dQ = \frac{kS\Delta T}{h}\tau, \qquad (1)$$

где dQ – количество тепла, прошедшего через поверхность S за время τ при разности температур ΔT, k – коэффициент теплопроводности, h – толщина слоя.

Удельная энергия клетки однозначно связана с температурой и фазовым состоянием

$$q = \frac{Q}{\rho h S}, \qquad (2)$$

где ρ – плотность.

Одномерная клеточно-автоматная модель затвердевания металлов и сплавов

Рассмотрим одномерную клеточно-автоматную модель процесса затвердевания (рис. 1), взаимодействие в которой определяется окрестностью Мура [5], т.е. в расчете принимают участие только лишь те клетки, которые имеют непосредственный контакт с рассматриваемой клеткой.

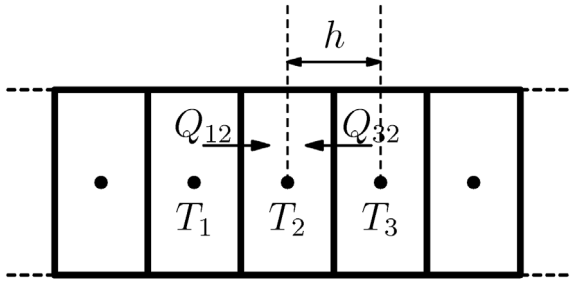


Рисунок 1 – Схематичное представление группы клеток с окрестностью Мура для одномерного случая

Если в (1) дифференциал заменить разностью, поток тепла, поступающий в клетку 2 от клетки 1, определяется по формуле

$$Q_{12} = \frac{k_{12} S \left(T_1 - T_2\right) \tau}{h}, \qquad (3)$$

где k_{12} – эффективный коэффициент теплопроводности, определяемый из равенства тепловых потоков на границе соседних клеток.

Тепловой поток (рис. 2), соответствующий количеству теплоты, переданному через изотермическую поверхность в единицу времени, определяется соотношением

$$P = \frac{kS \triangle T}{h}.$$

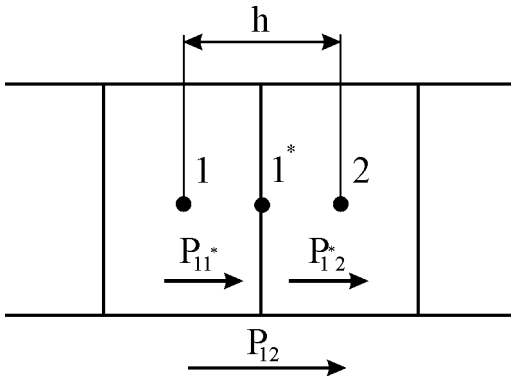


Рисунок 2 – Схема движения теплового потока между клетками

При этом тепловой поток между клетками 1 и 2 равен

 ISSN 1991-7848

$$P_{12} = \frac{k_{12} S\left(T_2 - T_1\right)}{h}.$$

В свою очередь, тепловой поток до границы, разделяющей клетки со стороны клетки 1

$$P_{11^*} = \frac{k_1 S\left(T - T_1\right)}{h/2},$$

со стороны клетки 2:

$$P_{1^*2} = \frac{k_2 S\left(T_2 - T\right)}{h/2}.$$

Исходя их равенства тепловых потоков на границе клеток $P_{11^*} = P_{1^*2}$ находим T - температуру на границе клеток:

$$T = \frac{k_1 T_1 + k_2 T_2}{k_1 + k_2}.$$

Приравниваем $P_{12} = P_{11^*}$ и получаем значение эффективного коэффициента теплопроводности

$$k_{12} = \frac{2 k_1 k_2}{k_1 + k_2}. \qquad (4)$$

Таким образом, изменение полной энергии клетки 2 в соответствии с (3) равно

$$dQ_2 = \frac{\tau S}{h}\left(k_{12}\left(T_1 - T_2\right) + k_{23}\left(T_3 - T_2\right)\right). \qquad (5)$$

Следует, однако, отметить, что все приведенные выше рассуждения справедливы лишь для одномерного случая. В то же время, формулы для вычисления полной энергии клетки в двумерной и трехмерной декартовых координатных системах будут иметь аналогичный вид.

Трехмерная цилиндрическая клеточно-автоматная модель затвердевания металлов и сплавов

Для цилиндрической системы координат изменение полной энергии клетки вычисляется, исходя из закона Фурье, с учетом осевой симметрии. На рисунке 3 представлено изображение клетки в цилиндрической системе координат.

Прежде чем определять полное изменение энергии клетки необходимо определить площади боковых поверхностей клетки.

Введем следующие обозначения:

i - номер клетки в радиальном направлении;

j - секторальный номер клетки;

k - номер клетки вдоль оси симметрии;

h_i - длина клетки в радиальном направлении;

h_j - ширина клетки вдоль сектора зависит от положения клетки в радиальном направлении;

h_k - высота клетки вдоль оси симметрии;

n_i - количество клеток в радиальном направлении;

n_j - количество клеток вдоль сектора;

n_k - количество клеток вдоль оси симметрии.

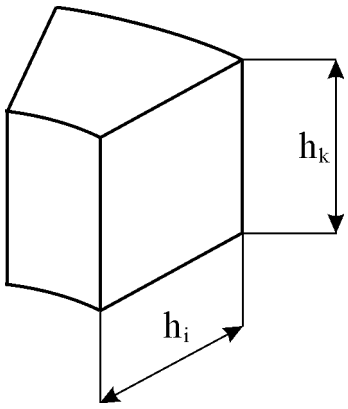


Рисунок 3 – Трехмерное изображение клетки в цилиндрической системе координат

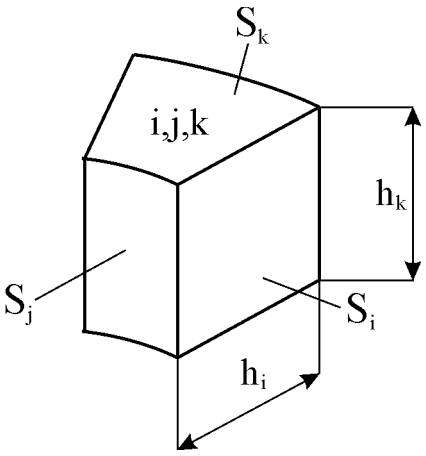


Рисунок 4 – Схематическое обозначение клетки и условные обозначения боковых площадей

На рисунке 4 приведено схематическое изображение клетки (i, j, k) и условные обозначения ее боковых поверхностей.

Боковые площади выражаются через номер клетки, длину клетки и количество клеток вдоль осей соответственно:

$$S_i = h_i h_k ,$$

$$S_j(i) = \frac{2\pi h_i (i-1)}{n_j} h_k ,$$

$$S_k(i) = \frac{\pi h_i^2 (2i-1)}{n_j} .$$

Ширина клетки вдоль сектора (рис. 5) зависит от положения клетки в радиальном направлении, т.е. от i

$$h_j(i) = \frac{2\pi h_i (i-0.5)}{n_j} .$$

 ISSN 1991-7848

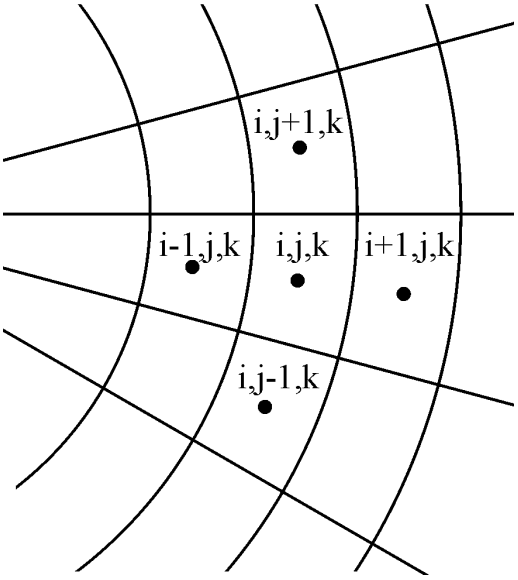


Рисунок - 5 Схематическое изображение клеток в цилиндрической системе координат (вид сверху)

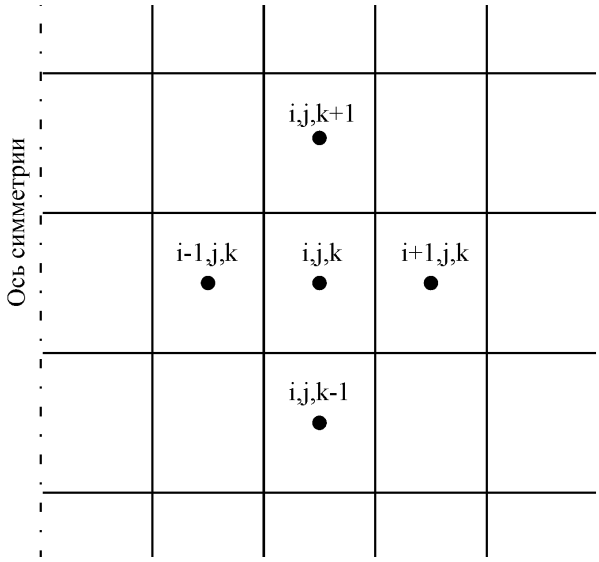


Рисунок 6 - Схематическое изображение клеток в цилиндрической системе координат (вид сбоку)

Изменение полной энергии клетки для цилиндрической системы координат состоит из сумм изменений полной энергии в радиальном и секторальном направлении, а так же вдоль оси симметрии тела.

Изменение полной энергии для i-й клетки в радиальном направлении в соответствии с (1):

$$Q_{i-1,i}^{j,k} = \frac{k_{i-1,i}^{j,k} S_j (i-1)\left(T_{i-1} - T_i\right)\tau}{h_i},$$

$$Q_{i+1,i}^{j,k} = \frac{k_{i+1,i}^{j,k} S_j (i)\left(T_{i+1} - T_i\right)\tau}{h_i};$$

для j сектора:

$$Q_{j-1,j}^{i,k} = \frac{k_{j-1,j}^{i,k} S_i \left(T_{j-1} - T_j\right)\tau}{h_j (i-1)},$$

$$Q_{j+1,j}^{i,k} = \frac{k_{j+1,j}^{i,k} S_i \left(T_{j+1} - T_j\right)\tau}{h_j (i)};$$

вдоль оси симметрии:

$$Q_{k-1,k}^{i,j} = \frac{k_{k-1,k}^{i,j} S_k (i)\left(T_{k-1} - T_k\right)\tau}{h_k},$$

$$Q_{k+1,k}^{i,j} = \frac{k_{k+1,k}^{i,j} S_k (i)\left(T_{k+1} - T_k\right)\tau}{h_k}.$$

Изменение полной энергии клетки является суммой изменений полной энергии во всех трех направлениях:

$$dQ_i = Q^{i,j}_{k-1,k} + Q^{i,j}_{k+1,k} + Q^{i,k}_{j-1,j} + \\ + Q^{i,k}_{j+1,j} + Q^{j,k}_{i-1,i} + Q^{j,k}_{i+1,i}.$$

В приведенных выше формулах неизвестным параметром является эффективный коэффициент теплопроводности, который рассчитывается из равенства тепловых потоков между клетками (рис. 7):

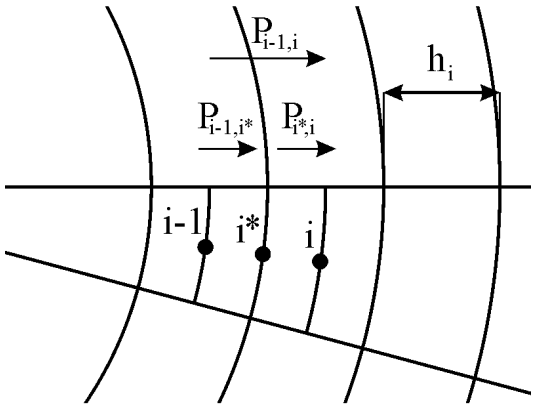


Рисунок 7 – Тепловые потоки между клетками для радиального распределения тепла

Тепловой поток между клетками $i-1$ и i определяется соотношением

$$P_{i-1,i} = \frac{k_{i-1,i}\left(T_i - T_{i-1}\right)}{h_i}\frac{2\pi h_i h_k (i-1)}{h_j}.$$

В свою очередь тепловой поток до границы, разделяющей клетки со стороны клетки $i-1$ определяется как

$$P_{i-1,i^*} = \frac{k_{i-1}\left(T^* - T_{i-1}\right)}{h_i/2}\frac{2\pi h_i h_k (i-0.75)}{n_j},$$

со стороны клетки i

$$P_{i^*,i} = \frac{k_i\left(T_i - T^*\right)}{h_i/2}\frac{2\pi h_i h_k (i+0.25)}{n_j}.$$

Исходя их равенства тепловых потоков на границе клетки $P_{i-1,i^*} = P_{i^*,i}$ находим T^* - температуру на границе клеток:

$$T = \frac{k_{i-1}T_{i-1}(i-0.75) + k_i T_i (i+0.25)}{k_{i-1}(i-0.75) + k_i (i+0.25)}.$$

Приравниваем $P_{i-1,i} = P_{i-1,i^*}$ и получаем значение эффективного коэффициента теплопроводности для распространения тепла в радиальном направлении:

$$k_{i-1,i} = \frac{2k_{i-1}k_i(i-0.75)(i+0.25)}{(i-1)(k_{i-1}(i-0.75)+k_i(i+0.25))}.$$

При вычислени изменения полной энергии вдоль оси симметрии и вдоль окружности эффективный коэффициент теплопроводности рассчитывается аналогично одномерному случаю по формуле (4).

На основании закона Фурье определено правило, описывающее зависимость полной энергии Q клетки (единичного объема) от температуры T соседних клеток, для одномерного, двумерного, трехмерного случаев и цилиндрических координат.

Для определения фазового состояния сформулируем правило определяющее зависимость температуры клетки от ее удельной внутренней энергии q, фазового состояния окружающих клеток и внешних условий.

Для представления фазового состояния сложных систем используются фазовые диаграммы, которые отображают тепловые эффекты фазового перехода, в частности определяют динамику выделения скрытой теплоты кристаллизации в интервале температур ликвидус-солидус[6].

В случае, если процесс затвердевания (плавления) происходит без выделения скрытой теплоты кристаллизации, то связь между удельной энергией q и температурой T описывается:

$$q = \int_0^T c(T)\,dt, \qquad (6)$$

где c – теплоемкость.

В случае непрерывности и положительной определенности функции $c(T)$ зависимость $q(T)$ однозначна.

Ведем обозначения: c_s, c_l – теплоемкость вещества в твердом и расплавленном состоянии соответственно; ρ_s, ρ_l – плотность вещества в твердом и расплавленном состоянии соответственно; $q_s = c_s T$, $q_l = c_l T + L$ – удельные энергии, соответствующие началу и концу фазового перехода, L – скрытая теплота кристаллизации.

Рассмотрим правило взаимосвязи температуры T и удельной энергии q для чистого металла или эвтектического сплава, т.е. сплава, не имеющего температурного интервала кристаллизации, затвердевание которого происходит при температуре T_f:

$$T(q) = \begin{cases} q/c_s, & q < q_s \\ (q-q_l)/c_l + T_f, & q > q_l \\ T_f, & q \in [q_s, q_l] \end{cases}. \qquad (7)$$

На рисунке 8 представлены зависимости температуры и количества жидкой фазы от удельной энергии для серого чугуна.

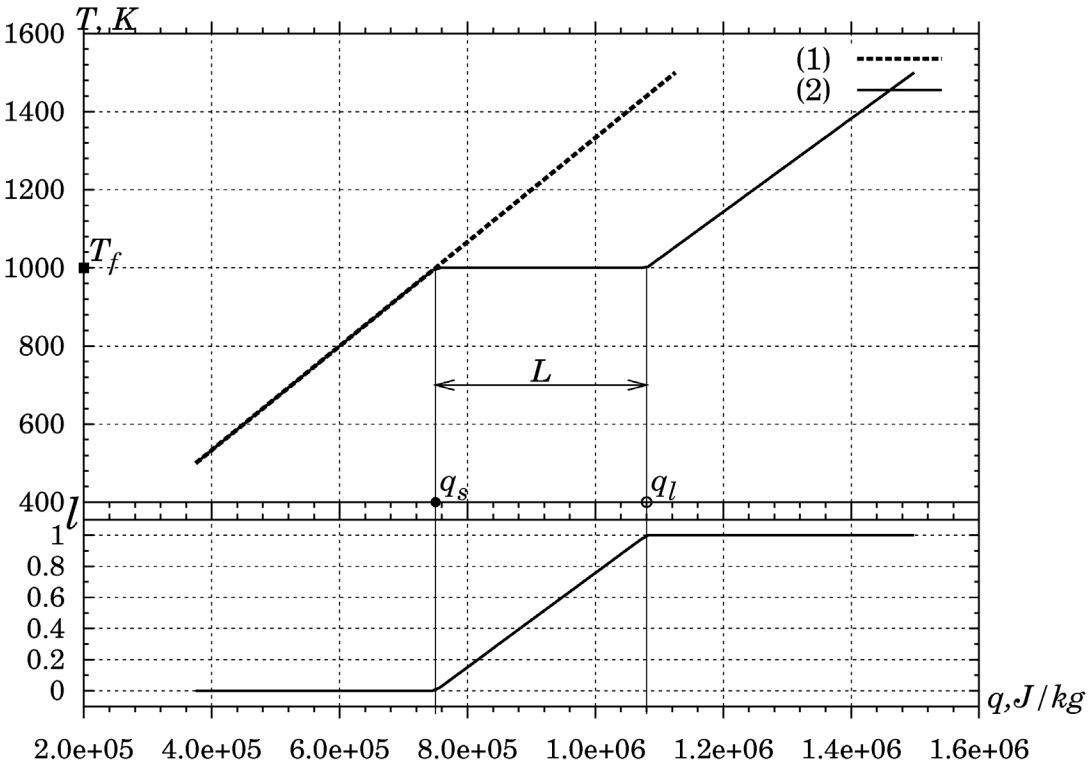


Рисунок 8 – Зависимости температуры и количества жидкой фазы от удельной энергии, 1 – при отсутствии фазового перехода, 2 – с учетом фазового перехода

Правило взаимосвязи удельной энергии q и температуры T выражается зависимостью

$$q(T,l)=\begin{cases} Tc_s, & T<T_f, l=0 \\ q_l+(T-T_f)c_l, & T>T_f, l=1 \\ q_s+Ll, & T=T_f, l\in[0,1] \end{cases} \qquad (8)$$

где l - количество жидкой фазы, 0 соответствует твердому состоянию, 1 – жидкому.

На рисунке 9 проведены значения температуры в соседних клетках и соответствующие им значения удельной энергии и доли жидкой фазы в зоне фазового перехода. Из рисунка видно, что 12 клетка имеет температуру фазового перехода и удельную энергию, лежащую в интервале кристаллизации, что свидетельствует о том, что в этой клетке происходит фазовый переход – количество жидкой фазы меньше 1.

Это тем самым подтверждает, что применение клеточных автоматов позволяет корректно описать термодинамические процессы при затвердевании металла с учетом фазовых превращений.

Задание граничных условий в клеточно-автоматных моделях, осуществляется заданием типов клеток автомата. Например, граничные условия первого рода, которые определены в виде известной зависимости

 ISSN 1991-7848

температуры от времени $T(t)$ на поверхности образца в терминах клеточно-автоматного подхода имеют вид:

$$dQ_2 = \frac{\tau S}{h}\left(k_{12}\left(T(t) - T_2\right) + k_{23}\left(T_3 - T_2\right)\right). \quad (12)$$

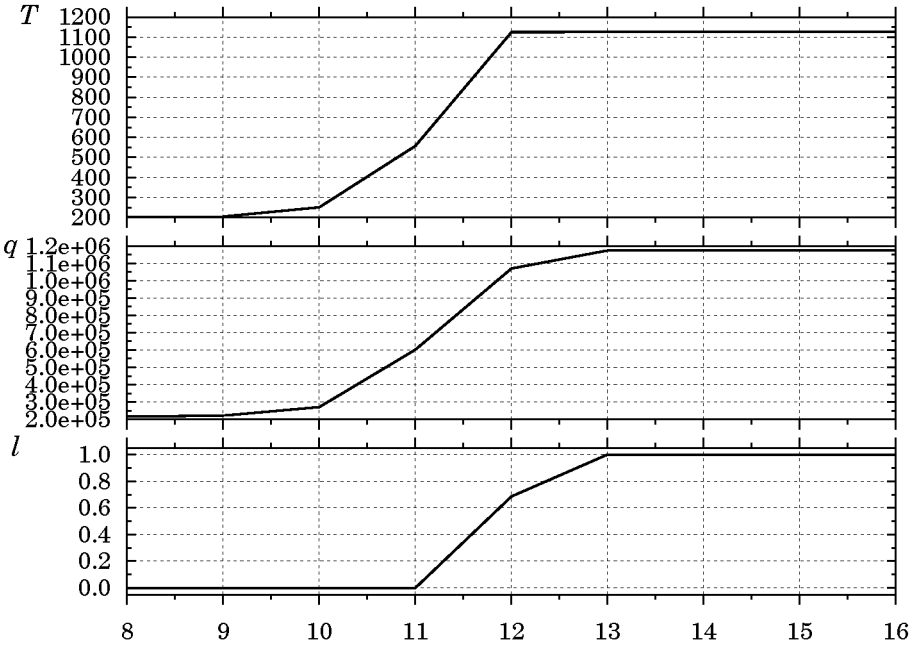


Рисунок 9 – Распределение a) – температуры, b) – удельной энергии, c) – доли жидкой фазы для клеток в зоне фазового перехода

Здесь функция $T(t)$ задана на левой границе тестового объекта.

Граничные условия второго рода определены в виде теплового потока $Q(t)$ как функции времени на поверхности тела:

$$dQ_2 = Q(t) + \frac{\tau S}{h} k_{23}\left(T_3 - T_2\right). \quad (13)$$

В свою очередь граничные условия третьего рода описывают взаимодействие тела с окружающей средой по закону конвективного теплообмена:

$$dQ_2 = \alpha\left(T_1 - T_{out}\right) + \frac{\tau S}{h} k_{23}\left(T_3 - T_2\right), \quad (14)$$

где α – коэффициент теплообмена $\left[Bm/м^2\right]$.

Для лучистого теплообмена граничное условие в терминах клеточных автоматов сформулировано как

$$dQ_2 = \varepsilon_o \sigma\left(T_1^4 - T_{out}^4\right) + \frac{\tau S}{h} k_{23}\left(T_3 - T_2\right), \quad (15)$$

где ε_o – постоянная, характеризующая степень черноты тела, σ – постоянная Стефана-Больцмана.

Прикладная часть

Для тестирования предложенной математической модели разработано приложение на языке С++, которое выполняет расчет зависимости распределения температуры в моделируемом объекте от времени.

Для сравнения решения полученного с применением клеточно-автоматного подхода было программно реализовано аналитическое решение, задачи Стефана для затвердевания полупространства, и решение задачи Стефана-Шварца для задачи затвердевания металла в неограниченной форме.

Выводы

Температурное поле, полученное на основании решения Стефана и клеточно-автоматного подхода, характеризуется абсолютной погрешностью 0.92%, т.е. не более 1% отклонения от реальных данных. Закон сохранения энергии для обоих решений выполняется.

В то же время сравнение температурных полей полученных путем программной реализации решения Стефана-Шварца и клеточно-автоматного метода показало значительное отклонение, полученных решений составляющее 17.29%. При этом наблюдается нарушение закона сохранения энергии при расчете температурного поля методом Стефана-Шварца. Теряется 38.15% энергии системы.

Таким образом, предложенные машины клеточных автоматов и правила перехода клеток из одного состояния в другое, являются адекватными моделями, основанными на природных свойствах систем, и могут быть использованы для описания процессов затвердевания металлов и сплавов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лебедев А. М. Моделирование в научно-технических исследованиях. - М.: Радио и связь, 1989.
2. Малинецкий Г.Г., Потапов А.Б., Подлазов А.В. Нелинейная динамика: подходы, результаты, надежды. – М.: КомКнига, 2006.
3. Разностные схемы (введение в теорию), С.К. Годунов, В.С. Рябенький, учебное пособие. - М.: Наука, 1977.
4. Самарский А.А. Теория разностных схем. – М.: Наука, 1989.
5. Тоффоли Т., Марголус Н. Машины клеточных автоматов. – М.: Мир, 1991.
6. Баландин Г.Ф. Основы теории формирования отливки. В 2-х частях. Ч.1. Тепловые основы теории. Затвердевание и охлаждение отливки. - М.: Машиностроение, 1976.
7. Вайнгард У. Введение в физику кристаллизации металла. – М.: Мир, 1967.

 ISSN 1991-7848

УДК 621.057

Е.Ю. Новикова, А.И. Михалев, Ю.А. Бубликов

НЕЧЕТКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА МИКРОЛЕГИРОВАНИЯ СТАЛИ С КАРБОНИТРИДНЫМ УПРОЧНЕНИЕМ

В данной работе для определения влияния концентраций, как базовых элементов, так и микролегирующих добавок на величину зерна и механические свойства стали 20ГЛ с карбонитридным упрочнением и нахождения их оптимальных содержаний с целью снижения расхода легирующих материалов были использованы методы и алгоритмы нечеткой логики. Модели описывают явления и процессы реального мира на естественном языке с использованием лингвистических переменных.

У даній роботі для визначення впливу концентрацій, як базових елементів, так і мікролегуючих добавок на величину зерна й механічні властивості стали 20ГЛ із карбонітрідним зміцненням і знаходження їхніх оптимальних змістів з метою зниження витрати легуючих матеріалів були використані методи й алгоритми нечіткої логіки. Моделі описують явища й процеси реального миру природною мовою за допомогою лінгвістичних змінних.

In this work for determination of influencing concentrations as base elements of so micro-alloying additions on the size corn and mechanical properties 20GL became with the carbonitrides hardening and findings of their optimum maintenances with the purpose decline expense of alloying materials were to applying methods and algorithms of fuzzy logic. Models of fuzzy logic describe the phenomena and processes of the real world in human language through linguistic variables.

Ведение

Для получения литых изделий с высокими эксплуатационными характеристиками на сегодняшний день используют стали легированные дорогими элементами (например, никелем, хромом, ванадием, молибденом, медью), применение которых существенно увеличивает себестоимость отливок, и как правило, не компенсируются соответственным снижением металлоемкости. Одним из перспективных направлений повышения свойств литого металла является карбонитридное упрочнение, которое достаточно широко используется для деформируемых сталей типа Г2, микролегированных азотом и ванадием (ниобием) [5].

Широкое распространение сталей этого класса в значительной мере ограничивается также отсутствием в Украине собственной сырьевой базы для производства сплавов этих элементов и их высокой стоимостью. В то же время данные свидетельствуют о том, что эта задача может быть успешно решена использованием относительно дешевых, а главное, доступных нитридообразующих элементов – титана и алюминия.

Для достижения этой цели выполнены исследования, направленные на определение оптимального состава литой стали 20ГЛ, модифицированной

© НОВИКОВА Е.Ю., МИХАЛЕВ А.И., БУБЛИКОВ Ю.А., 2006

азотом и относительно дешёвыми и доступными алюминием и титаном вместо дорогих и дефицитных ванадия, никеля и хрома.

Для определения влияния концентраций как базовых элементов так и микролегирующих добавок на величину зерна и механические свойства стали 20ГЛ с карбонитридным упрочнением и нахождения их оптимальных содержаний с целью снижения расхода легирующих материалов применяются методы и алгоритмы нечеткой логики [1,4].

Постановка задачи

Задача состоит в том, чтобы разработать эффективные экспертные системы, реализованные в виде систем нечеткого вывода. Это позволит определить предел текучести, ударную вязкость KCU и балл зерна на основании результатов испытаний стали 20ГЛ с карбонитридным упрочнением:

- 21 плавка, индукционная печь;
- 45 плавок, цеховая технология,

т.е. субъективных оценок экспертов микролегирования электростали 20ГЛ азотом (АЛК), титаном (Ti) и алюминием (Al) [6].

Методы и алгоритмы нечеткой логики

Нечеткие знания формулируются в виде нечетких продукционных правил вывода, задаваемых в форме «ЕСЛИ-ТО» (англ.: if-then rule):

$$\text{ЕСЛИ x это A, ТО y это B,} \qquad (1)$$

где A и B – это лингвистические термы и соответствующие им функции принадлежности $\mu_A(x), \mu_B(x)$, построенные в пространстве входных значений X и выходных Y. Для m правил, база правил будет иметь следующий вид:

$$\begin{gathered}
R_i: \text{ЕСЛИ } x_1 \text{ это } A_{11} \ldots \text{И} \ldots x_n \text{ это } A_{1n}, \\
\text{ТО y это } B_1 \\
R_i: \text{ЕСЛИ } x_1 \text{ это } A_{i1} \ldots \text{И} \ldots x_n \text{ это } A_{in}, \\
\text{ТО y это } B_i \\
\ldots\ldots \\
R_m: \text{ЕСЛИ } x_1 \text{ это } A_{i1} \ldots \text{И} \ldots x_n \text{ это } A_{mn}, \\
\text{ТО y это } B_m,
\end{gathered} \qquad (2)$$

где $x_j, j = \overline{1,n}$ - имена входных переменных; y - имя выходной переменной; $A_{ij}, i = \overline{1,m}, j = \overline{1,n}$ - заданные функции принадлежности.

Результатом нечеткого вывода является четкое значение переменной $\tilde{y} \in Y$ на основе заданных четких значений $\tilde{x_j} \in X, j = \overline{1,n}$.

Для обеспечения в данной работе базы правил с механизмами ввода-вывода создается система, которая включает в себя четыре этапа (рис. 1):

 ISSN 1991-7848

- Введение нечеткости (фаззификация). Фаззификатор, преобразует фиксированный вектор влияющих факторов X в вектор нечетких множеств $\overline{X}$, необходимых для выполнения нечеткого логического вывода.
- Машина нечеткого логического вывода, которая на основе правил базы знаний определяет значение выходной переменной в виде нечеткого множества $\overline{Y}$, соответствующего нечетким значениям входных переменных $\overline{X}$.
- Композиция и приведение к четкости, или дефаззификация. Дефаззификатор, преобразует выходное нечеткое множество $\overline{Y}$ в конкретное число Y.

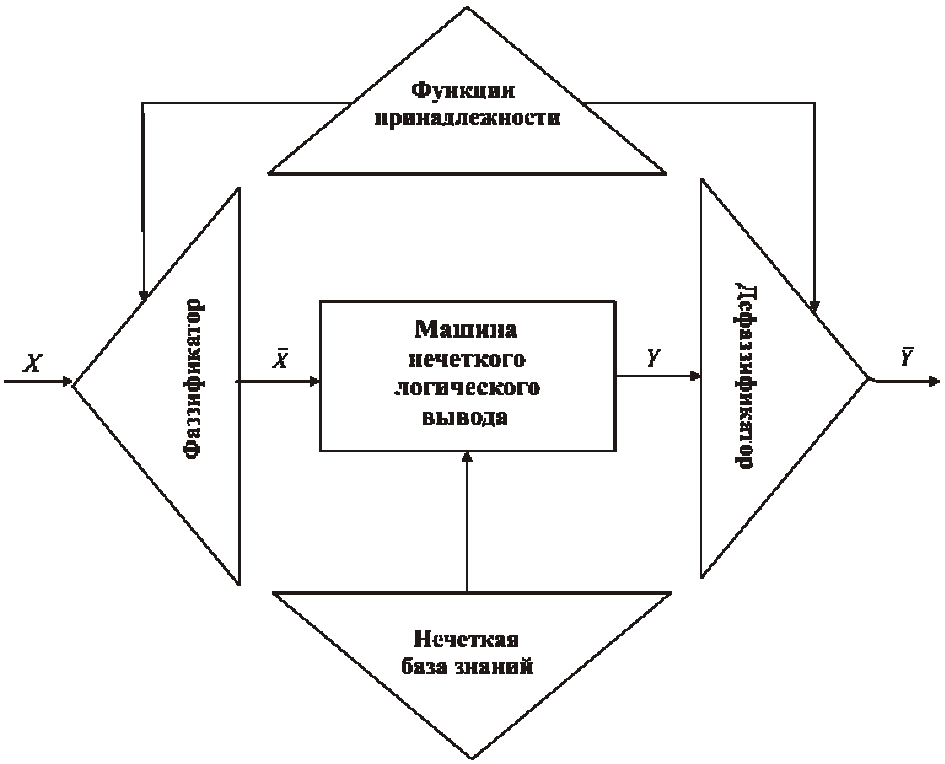


Рисунок 1 - Структура нечеткой системы

Для реализации системы ввода-вывода в машине нечеткого логического вывода использован алгоритм Е. Мамдани [2,3].

Данный алгоритм математически описывается следующим образом:

1. Процедура фаззификации: определяются степени истинности, т.е. значения функций принадлежности (ФП) для левых частей каждого правила (предпосылок). Для базы знаний с m правилами вида (2) обозначим степени истинности как

$$A_{ij}(\widetilde{x_j}),\ i=\overline{1,m},\ j=\overline{1,n}. \qquad (3)$$

2. Нечеткий вывод. Сначала определяются уровни «отсечения» для левой части каждого из правил. В качестве *t*-нормы выступает логический минимум (min):

$$\alpha_i = \min_j(A_{ij}(\widetilde{x}_j)), i = \overline{1,m},\ j = \overline{1,n}. \quad (4)$$

Далее находятся «усеченные» функции принадлежности

$$B_i^{'}(y) = \min_i(\alpha_i, B_i(y)), i = \overline{1,m}. \quad (5)$$

3. Композиция, или объединение полученных усеченных функций, для чего используется максимальная композиция:

$$\mu(y) = \max(B_i^{'}(y)), i = \overline{1,m}, \quad (6)$$

где $\mu(y)$ – функция принадлежности итогового нечеткого множества.

4. На этапе дефаззификации приведение к четкости можно осуществить разными методами.

Метод среднего центра, или центроидный метод:

$$\widetilde{y} = \frac{\int_y yB(y)}{\int_y B(y)}, \quad (7)$$

или для дискретного варианта:

$$\widetilde{y} = \frac{\sum_{i=1}^{m} \alpha_i y_i}{\sum_{i=1}^{m} \alpha_i}. \quad (8)$$

Метод среднего максимума:

$$\widetilde{y} = \frac{\sum_{k=1}^{r} y_i}{r},$$

где r – число точек переменной y, в которых $B(y)$ достигает максимального значения.

Нечеткое моделирование

В качестве входных параметров системы нечеткого вывода, для первого случая (21 плавка, индукционная печь) будем рассматривать 6 нечетких лингвистических переменных: «расход АЛК» (“Alk”), «уровень Ti» (“Ti ”), «уровень Al» (“Al”), «уровень Si» (“Si”), «уровень Mn» (“Mn”), «уровень C» (“C”). При этом в качестве выходных (оптимизационных) параметров выступают нечеткие лингвистические переменные «предела текучести» (“Limit”), «балл зерна» (“Z”) и «ударная вязкость» (“KCU”).

 ISSN 1991-7848

Структурно - логическая модель влияния технологических факторов на свойства стали марки 20ГЛ представлена графом на рисунке 2.

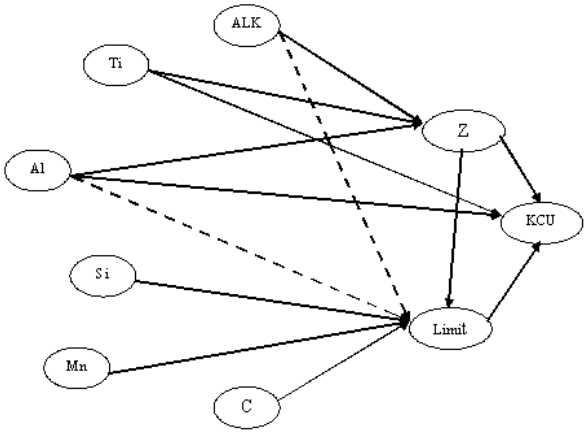


Рисунок 2 - Граф влияния технологических факторов на свойства стали 20 ГЛ (21 плавка, индукционная печь)

В качестве терм-множеств входных лингвистических переменных (ЛП) будем использовать множества: T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, T_6.

1-ая ЛП: «расход АЛК» (“Alk”) будем использовать множество T_1 = {«наименьший» (“VerySmall”), «малый» (“Small”), «средний» (“Middle”), «высокий» (“High”), «наивысший» (“VeryHigh”)}. Производится оценка по 7,5 бальной порядковой шкале, при которой цифре 0 соответствует наименьшая оценка, а цифре 7,5 – наивысшая оценка;

2-ая ЛП: «уровень Ti» (“Ti”) будем использовать множество T_2 = {«наименьший» (“VerySmall”), «малый» (“Small”), «средний» (“Middle”), «высокий» (“High”), «наивысший» (“VeryHigh”)}. Производится оценка по 0,11 бальной порядковой шкале, при которой цифре $\leq$0,008 соответствует наименьшая оценка, а цифре 0,11 – наивысшая оценка;

3-ия ЛП: «уровень Al» (“Al”) будем использовать множество T_3 = {«наименьший» (“VerySmall”), «малый» (“Small”), «средний» (“Middle”), «высокий» (“High”), «наивысший» (“VeryHigh”)}. Производится оценка по 0,07 бальной порядковой шкале, при которой цифре $\leq$0,02 соответствует наименьшая оценка, а цифре 0,07 – наивысшая оценка;

4-ая ЛП: «уровень Si» (“Si”), будем использовать множество T_4 = {«наименьший» (“VerySmall”), «малый» (“Small”), «средний» (“Middle”), «высокий» (“High”), «наивысший» (“VeryHigh”)}. Производится оценка по 0,55 бальной порядковой шкале, при которой цифре 0,30 соответствует наименьшая оценка, а цифре 0,55 – наивысшая оценка;

5-ая ЛП: «уровень Mn» (“Mn”), будем использовать множество T_5 = {«наименьший» (“VerySmall”), «малый» (“Small”), «средний» (“Middle”), «высокий» (“High”), «наивысший» (“VeryHigh”)}. Производится оценка по 1,52 бальной порядковой шкале, при которой цифре 1,18 соответствует наименьшая оценка, а цифре 1,52 – наивысшая оценка;

6-ая ЛП: «уровень С» (“C”), будем использовать множество T_6 = {«наименьший» (“VerySmall”), «малый» (“Small”), «высокий» (“High”), «наивысший» (“VeryHigh”)}. Производится оценка по 0,24 бальной порядковой шкале, при которой цифре 0,17 соответствует наименьшая оценка, а цифре 0,24 – наивысшая оценка.

В качестве терм-множеств выходных ЛП будем использовать множества P_1, P_2, P_3.

1-ая ЛП: «балл зерна» (“Ball”) будем использовать множество P_1 = {«min» (“Min”), «средний» (“Middle”), «max» (“Max”)}. Производится оценка по 9,5 бальной порядковой шкале, при которой цифре $\leq$8,75 соответствует наименьшая оценка, а цифре 9,5 – наибольшая оценка, смотри таблицу соответствий 1.1;

2-ая ЛП: «предела текучести» (“Limit”) будем использовать множество P_2 = {«min» (“Min”), «ниже среднего» (“BelowMiddle”), «средний» (“Middle”), «max» (“Max”)}. Производится оценка по 465 бальной порядковой шкале, при которой цифре $\leq$390 соответствует наименьшая оценка, а цифре 465 – наибольшая оценка;

Таблица 1

Таблица соответствий фактического балла зерна и оценочной шкалы нечеткого терм-множества «балл зерна»

Фактический балл зерна	Оценочная шкала нечеткого терм-множества «балл зерна»
8,9	8.5
9,8	8.75
9	9.0
9,10,8 (8,9,10)	9.25
9,10	9.5
10,9	9.75
10	10

3-ая ЛП: 2-ая ЛП: «ударная вязкость» (“KCU”) будем использовать множество P_3= {«min» (“Min”), «ниже среднего» (“BelowMiddle”), «средний» (“Middle”), «max» (“Max”)}. Производится оценка по 465 бальной порядковой шкале, при которой цифре $\leq$390 соответствует наименьшая оценка, а цифре 465 – наибольшая оценка.

Для второго случая (45 плавок, цеховая технология), в качестве входных параметров системы нечеткого вывода будем рассматривать 7 нечетких лингвистических переменных: «уровень С» (“C”), «уровень Mn» (“Mn”), «уровень Si» (“Si”), «уровень P» (“P”), «уровень S» (“S”), «уровень Al» (“Al”), «уровень Ti» (“Ti”). При этом в качестве выходных (оптимизационных) параметров выступают нечеткие лингвистические переменные «предела текучести» (“Limit”), «балл зерна» (“Ball”) и «ударная вязкость» (“KCU”). Структурно – логическая модель влияния

 ISSN 1991-7848

технологических факторов на свойства стали марки 20ГЛ представлена графом на рисунке 3.

В качестве терм-множеств входных лингвистических переменных (ЛП) будем использовать множества: T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, T_6.

1-ая ЛП: «уровень С» (“С”) будем использовать множество T_1 = {«наименьший» (“VerySmall”), «малый» (“Small”), «средний» (“Middle”), «высокий» (“High”), «наивысший» (“VeryHigh”)}. Производится оценка по 0,25 бальной порядковой шкале, при которой цифре 0,18 соответствует наименьшая оценка, а цифре 0,25 – наивысшая оценка;

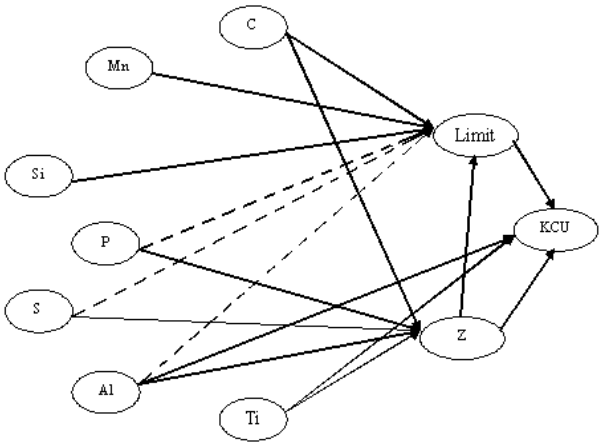


Рисунок 3 - Граф влияния технологических факторов на свойства стали 20 ГЛ (45 плавок по цеховой технологии)

2-ая ЛП: «уровень Mn» (“Mn”) будем использовать множество T_2 = {«наименьший» (“VerySmall”), «малый» (“Small”), «средний» (“Middle”), «высокий» (“High”), «наивысший» (“VeryHigh”)}. Производится оценка по 1,43 бальной порядковой шкале, при которой цифре 1,11 соответствует наименьшая оценка, а цифре 1,43 – наивысшая оценка;

3-ия ЛП: «уровень Si» (“Si”) будем использовать множество T_3 = {«наименьший» (“VerySmall”), «малый» (“Small”), «средний» (“Middle”), «высокий» (“High”), «наивысший» (“VeryHigh”)}. Производится оценка по 0,8 бальной порядковой шкале, при которой цифре 0,29 соответствует наименьшая оценка, а цифре 0,8 – наивысшая оценка;

4-ая ЛП: «уровень Р» (“Р”), будем использовать множество T_4 = {«наименьший» (“VerySmall”), «малый» (“Small”), «средний» (“Middle”), «высокий» (“High”), «наивысший» (“VeryHigh”)}. Производится оценка по 0,025 бальной порядковой шкале, при которой цифре 0,016 соответствует 5-ая ЛП: «уровень S» (“S”), будем использовать множество T_5 = {«наименьший» (“VerySmall”), «малый» (“Small”), «средний» (“Middle”), «высокий» (“High”), «наивысший» (“VeryHigh”)}. Производится оценка по 0,034 бальной порядковой шкале, при которой цифре 0,018 соответствует наименьшая оценка, а цифре 0,034 – наивысшая оценка;

6-ая ЛП: «уровень Al» (“Al”), будем использовать множество T_6 = {«наименьший» (“VerySmall”), «малый» (“Small”), «высокий» (“High”),

«наивысший» (“VeryHigh”)}. Производится оценка по 0,06 бальной порядковой шкале, при которой цифре 0,023 соответствует наименьшая оценка, а цифре 0,06 – наивысшая оценка.

7-ая ЛП: «уровень Ti» (“Ti”), будем использовать множество T_6 = {«наименьший» (“VerySmall”), «малый» (“Small”), «высокий» (“High”), «наивысший» (“VeryHigh”)}. Производится оценка по 0,015 бальной порядковой шкале, при которой цифре 0,003 соответствует наименьшая оценка, а цифре 0,015 – наивысшая оценка.

В качестве терм-множеств выходных ЛП будем использовать множества P_1, P_2, P_3.

1-ая ЛП: «балл зерна» (“Ball”) будем использовать множество P_1 = {«min» (“Min”), «средний» (“Middle”), «max» (“Max”)}. Производится оценка по 10 бальной порядковой шкале, при которой цифре $\leq$8,75 соответствует наименьшая оценка, а цифре 10 – наибольшая оценка, смотри таблицу соответствий 1.1;

2-ая ЛП: «предела текучести» (“Limit”) будем использовать множество P_2 = {«min» (“Min”), «ниже среднего» (“BelowMiddle”), «средний» (“Middle”), «max» (“Max”)}. Производится оценка по 415 бальной порядковой шкале, при которой цифре $\leq$360 соответствует наименьшая оценка, а цифре 415 – наибольшая оценка;

3-ая ЛП: 2-ая ЛП: «ударная вязкость» (“KCU”) будем использовать множество P_3= {«min» (“Min”), «ниже среднего» (“BelowMiddle”), «средний» (“Middle”), «max» (“Max”)}. Производится оценка по 96 бальной порядковой шкале, при которой цифре $\leq$25 соответствует наименьшая оценка, а цифре 96 – наибольшая оценка.

С учетом сделанных уточнений, рассмотренная субъективная информация о пределе текучести, балле зерна и ударной вязкости, база правил для нечеткого логического контроллера может быть представлена в формате (алгоритм нечеткого вывода Е. Мамдан): 27 правил нечетких продукций для 21 плавки в индукционной печи (см. таблицу 3) и 40 правил для 45 плавок проведенных по цеховой технологии (см. таблицу 4).

Таблица 2

Таблица соответствий фактического балла зерна и оценочной шкалы нечеткого терм-множества «балл зерна»

Фактический балл зерна	Оценочная шкала нечеткого терм-множества «балл зерна»
7,8	8.5
8,7	8.75
7,8,9	9.0
8	9.25
8,9	9.5
9	10

 ISSN 1991-7848

Таблица 3

Таблица правил нечеткой базы знаний, 21 плавка (индукционная печь)

п/п	Входы						Выходы		
	АЛК	Ti	Al	Si	Mn	C	Z	$\sigma_т$	KCU
1	VS	VS	S	S	S	H	Min	Min	M
2	S	VS	S	S	S	S	Min	BM	M
3	S	S	S	H	H	S	M	M	Max
4	S	S	M	VS	VS	VS	Max	BM	Max
5	S	S	M	VS	VS	VS	Max	BM	M
6	S	S	M	S	S	S	Max	BM	M
7	S	S	M	M	H	VS	Max	BM	Max
8	S	S	M	H	H	S	M	M	Max
9	S	M	VS	H	VH	H	Max	M	BM
10	S	M	VS	H	VH	H	Max	Max	M
11	S	M	S	VS	VH	H	Min	Max	M
12	S	M	S	VS	VH	H	Min	Max	Max
13	S	M	M	M	H	H	Max	M	Max
14	S	M	H	H	M	S	Min	M	Max
15	S	H	VH	H	M	S	Max	BM	Max
16	M	H	VH	M	M	S	Max	BM	Max
17	M	H	VH	M	M	S	Max	BM	M
18	H	M	S	M	S	H	Max	Max	Min
19	H	M	M	S	S	H	Max	M	M
20	H	M	H	M	M	H	Max	Max	M
21	H	M	S	H	H	H	Max	Max	BM
22	H	M	S	H	H	H	Max	Max	Max
23	H	M	H	H	M	H	Max	M	Max
24	VH	VH	H	H	M	S	Max	Max	Min
25	VH	VH	H	H	M	S	Max	Max	BM
26	S	S	M	VH	M	VS	Max	M	Max
27	S	S	M	VH	M	S	Max	Max	Max

Для формирования базы правил использован полный набор возможных ситуаций и сочетаний лингвистических зависимостей, имевших место при проведении 21 плавки в индукционной печи.

В базе правил приняты следующие сокращения:

По входным сигналам: VS – технологическая величина, является наименьшей; S – технологическая величина, является малой; M – технологическая величина, средней; H – технологическая величина, высокой; VH – технологическая величина, является наивысшей.

По выходным сигналам: M – технологическая величина, является средней; BM – технологическая величина, является ниже средней; Min – технологическая величина, является минимальной; Max – технологическая величина, является максимальной.

Таблица 4

Таблица правил нечеткой базы знаний, 45 плавок (цеховая технология)

п/п	Входы							Выходы		
	C	Mn	Si	P	S	Al	Ti	Limit	KCU	Ball
1	VS	M	S	M	H	S	VS	min	max	M
2	VS	S	M	VS	H	M	H	min	BM	M
3	S	H	S	VS	S	H	S	min	BM	min
4	S	M	M	M	S	S	VS	min	M	min
5	S	H	M	H	H	M	H	min	M	max
6	S	H	M	VH	M	M	S	BM	BM	max
7	S	M	S	M	M	M	S	min	M	M
8	S	H	VS	VS	H	S	H	min	M	M
9	S	M	S	M	S	S	M	min	M	min
10	M	H	S	H	M	S	VS	min	M	max
11	M	H	S	S	VH	S	VS	M	M	M
12	M	VS	M	VS	M	M	S	min	M	min
13	M	H	M	VS	M	M	H	BM	max	M
14	M	VH	M	VS	H	S	S	min	max	M
15	M	M	S	S	VH	M	H	BM	BM	M
16	M	H	S	H	M	S	VS	M	max	M
17	M	VH	M	VS	S	M	M	M	max	max
18	M	S	M	H	VH	M	VS	min	M	max
19	M	M	S	VS	M	M	M	min	max	M
20	M	S	S	VS	H	S	H	min	M	max
21	M	H	M	VH	H	M	S	min	M	min
22	M	M	S	VS	S	M	VS	min	max	M
23	M	H	M	M	H	H	H	min	BM	M
24	M	VH	H	S	M	M	M	BM	M	max
25	H	M	M	VS	M	M	VS	min	M	min
26	H	VH	M	M	M	M	M	min	M	M
27	H	VH	S	M	M	S	VS	min	max	M
28	H	VH	S	H	H	M	VS	min	M	min
29	H	H	M	S	M	M	H	BM	BM	max
30	H	M	M	M	M	S	VS	min	M	min
31	H	M	M	VS	S	S	S	BM	max	M
32	H	VH	M	M	S	M	M	M	M	M
33	H	H	M	M	S	S	VS	min	M	M
34	H	S	VS	VS	M	M	VS	min	M	M
35	H	H	M	VS	H	S	VS	min	BM	M
36	H	VS	M	M	VH	S	VS	min	min	min
37	H	H	M	VS	S	S	VS	min	M	max
38	H	M	M	H	M	M	M	min	M	M
39	H	H	M	H	VH	M	M	M	BM	M
40	VH	M	H	M	M	H	M	BM	M	max

Для формирования базы правил использован полный набор возможных ситуаций и сочетаний лингвистических зависимостей, имевших место при проведении 45 плавок по цеховой технологии.

 ISSN 1991-7848

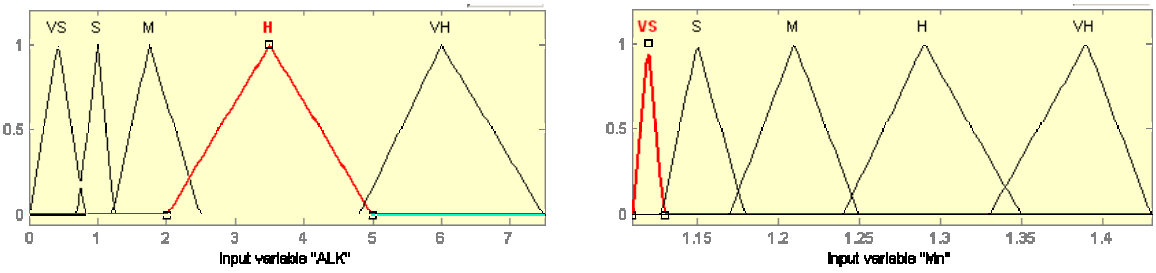
В базе правил приняты следующие сокращения:

По входным сигналам: VS – технологическая величина, является наименьшей; S – технологическая величина, является малой; M – технологическая величина, средней; H – технологическая величина, высокой; VH – технологическая величина, является наивысшей.

По выходным сигналам: M – технологическая величина, является средней; BM – технологическая величина, является ниже средней; Min – технологическая величина, является минимальной; Max – технологическая величина, является максимальной.

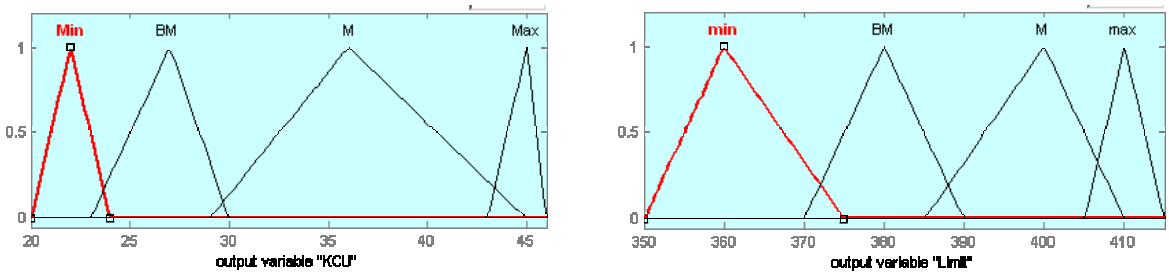
В результате работы с экспертами кафедры Цветной металлургии НМетАУ, г.Днепропетровск были выбраны границы термов и вид функций принадлежности. Так, для решения задачи фаззификации и дефаззификации предлагаются треугольные функции принадлеж-ности в обоих случаях, поскольку входные технологические величины лежат в доступном диапазоне.

В качестве примера, представим совокупность пар функции принадлежности входной переменной «содержание АЛК» и «уровень Mn» (рисунок 4) и функции принадлежности выходной переменной «KCU» и «предел текучести» (рис. 5).



a b

Рисунок 4 - Функции принадлежности входных ЛП: a) «содержание АЛК» и b) «уровень Mn»



a b

Рисунок 5 - Функции принадлежности выходных ЛП: a) «KCU» и b) «предел текучести»

Ввиду того, что каждый эксперт, участвующий в формировании баз правил в обоих случаях, является специалистом в развитии конкретно взятой ситуации технологического процесса, то построенная система с

применением ППП FuzzyLogicToolbox входящего в систему MATLAB [8], является концентрацией коллективных знаний. При этом модель обладает синергетическими свойствами и, без сомнений является более эффективной в управлении, чем действия отдельно взятого оператора.

Результат нечеткого моделирования для случая 21 плавка в индукционной печи следующие: содержание АЛК составляет 3,75 кг/т; уровень Ti - 0.02%; уровень Al - 0,035%; уровень Si - 0,475%; уровень Mn – 1,35%; уровень C - 0,205%; балл зерна 9,35 (9,10,8); предел текучести составляет 418 МПа и ударная вязкость KCU – 44.5 при -60 ^{0}C.

Таблица 5

Виды поверхностей нечеткого вывода для разработанной нечеткой модели 21 плавка в индукционной печи

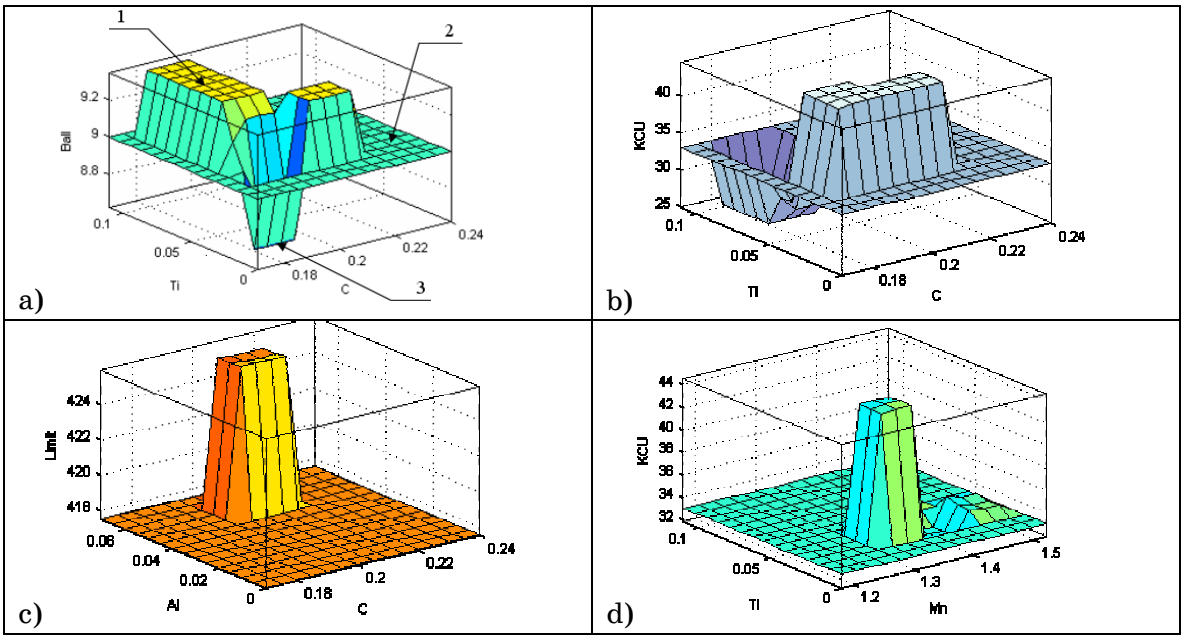
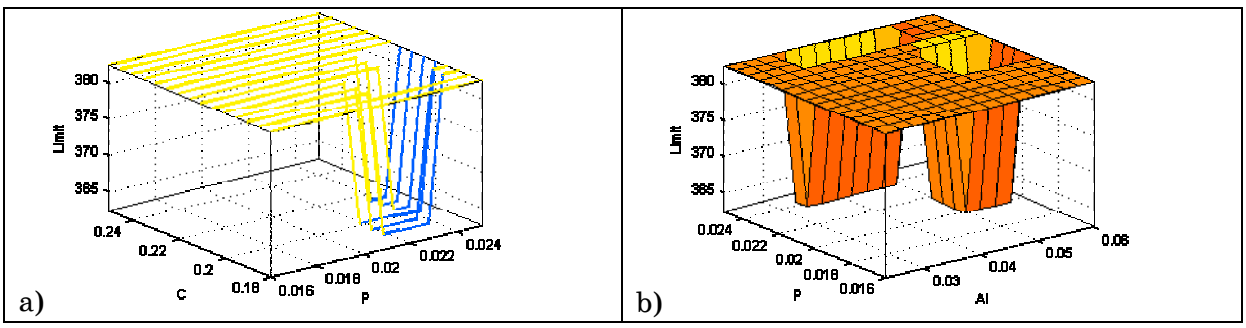
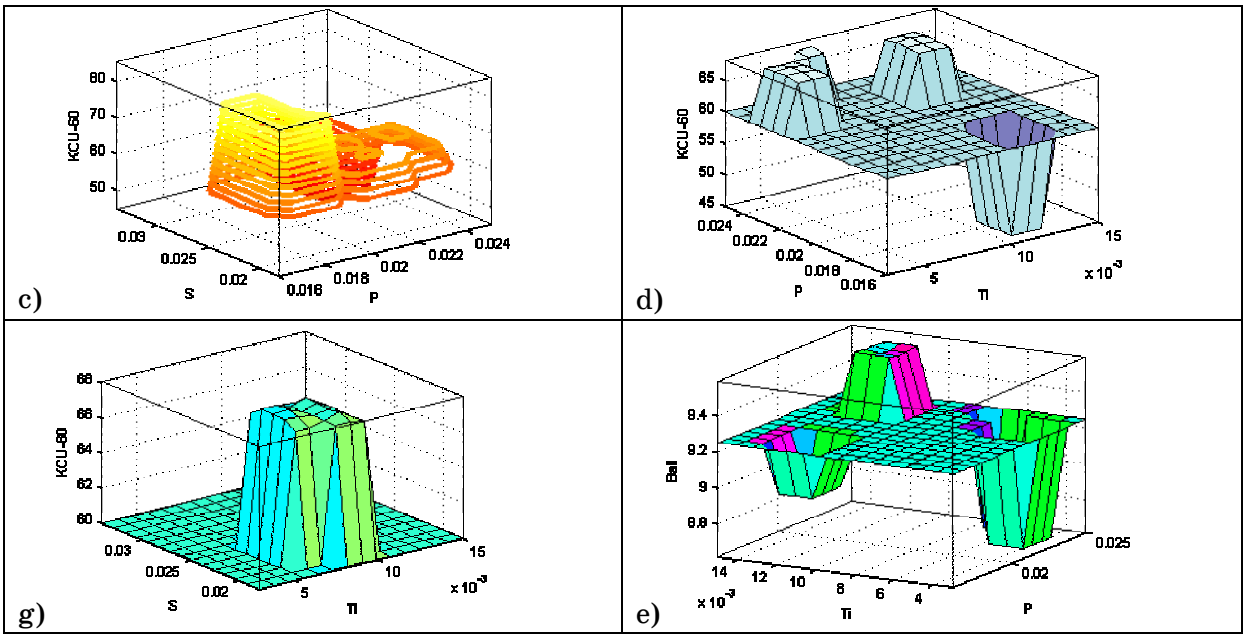


Таблица 6

Виды поверхностей нечеткого вывода для разработанной нечеткой модели 45 плавок, цеховая технология



 ISSN 1991-7848



Для 45 плавок, проведенных по цеховой технологии: уровень C - 0.215%; уровень Mn – 1.27%; уровень Si – 0.495%; уровень P - 0,0205%; уровень S – 0.026%; уровень Al – 0.0415%; уровень Ti – 0.009%; балл зерна 9,25 (8); предел текучести составляет 383 МПа и ударная вязкость KCU – 60 при -60 ^{0}C.

В таблице 5 и 6 представлены примеры поверхностей вывода, и показаны зависимости некоторых входных переменных от выходной для 21 плавки проведенных в индукционной печи и для 45 плавок проведенных по цеховой технологии соответственно. В таблице 5 на поверхности вида (а)) представлена зависимость величины балла зерна от уровня Ti и C с разделением на области. Область 1, является основной и иллюстрирует получение максимального балла зерна по уровню - 9,10,8. Область 2 иллюстрирует обеспечение балла зерна по уровню - 9. Область 3 иллюстрирует получение минимального балла зерна по уровню - 8.

Обобщая полученные результаты, проведем сравнительный анализ технологических факторов влияния на свойства стали марки 20 ГЛ с карбонитридным упрочнением, между модельными результатами полученными на 21 лабораторной плавке проведенных в индукционной печи (с АЛК), 45 промышленными плавками проведенными по цеховой технологии (без АЛК) и реальными производственными данными, см. таблицу 7.

Таблица 7

Сравнительная характеристика влияния технологических факторов на сталь 20ГЛ по результатам нечеткого моделирования

Технологические факторы	Входы						Выходы		
	ALK, %	C, %	Mn, %	Si, %	Al, %	Ti, %	Ball	KCU при -60^{0}C	Предел текучести (σ_T), МПа
21 лабораторная плавка, индукционная печь	3.75	0.205	1.35	0.475	0.035	0.02	9.35 (9,10,8)	44.5	418
45 опытно – промышленных плавок, цеховая технология	-	0.215	1.27	0.495	0.0415	0.009	9.25 (8)	60	383
Промышленные плавки (Среднее значение)	2.0-4.0 (2.77)	0.19-0.25 (0.217)	1.2-1.56 (1.37)	0.4-0.59 (0.474)	0.03-0.05 (0.043)	0.008-0.029 (0.021)	≥8 (8,9)	40-60 (53)	≥380-420 (400)
Среднее значение	3.26	0.212	1.33	0.481	0.039	0.017	-	52.5	400
Абсолютная погрешность Δ_{21}, %	0.98	0.012	0.02	0.001	0.008	0.001	-	8.5	18
Относительная погрешность ε_{21}, %	35.4	5.53	1.45	0.21	18.6	4.76	-	16.04	4.5
Абсолютная погрешность Δ_{45}, %	-	0.002	0.1	0.021	0.0015	-	-	7	17
Относительная погрешность ε_{45}, %	-	0.92	7.3	4.4	3.49	-	-	13.2	4.25

Вывод

Адекватность полученных результатов на 21 лабораторной плавке, проведенной в индукционной печи, и 45 плавках, проведенных по цеховой технологии, проверена на реальных плавках (см. таблицу 7).

Результаты подтверждают, и по некоторым химическим составляющим улучшают показатели производственных испытаний стали 20 ГЛ с карбонитридным упрочнением.

Применение разработанных нечетких моделей позволяет прогнозировать свойства выплавляемых сталей без больших затрат времени и материальных ресурсов, создает предпосылки для получения в будущем материалов заранее заданными физико-химическими характеристиками.

ЛИТЕРАТУРА

1. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и ее применение к принятию приближенных решений. — М.:Мир, 1976.— 167 с.
2. Прикладные нечеткие системы: Пер. с япон./ К. Асаи, Д. Ватада, С. Иваи и др.; под редакцией Т. Тэрано, К. Асаи, М.Сугэно. – М.: Мир, 1993. – 368с.
3. Круглов В.В., Дли М.И., Голунов Р.Ю. Нечеткая логика искусственные нейронные сети: Учеб. пособие. – М.: Издательство Физико-математической литературы, 2001. – 224с.
4. Новикова Е.Ю. Идентификация процесса выплавки FeSi с использованием алгоритмов нечеткого логического вывода - Нові технології №3(9) – 2005.- 222-224с.:ил.
5. Бодянский Е.В., Кучеренко Е.И., Михалев А.И. Нейрон- фаззи сети Петри в задачах моделирования сложных систем / Монографія (научное издание). – Дніпропетровськ: Системні технології, 2005. – 311с.
6. М.И. Гольдштейн, А.В. Гринь, Э.Э. Блюм и др. Упрочнение конструкторских сталей нитридами – М.:Металлургия, 1970-200с.
7. А.В. Рабинович, Г.Н. Трегубенк, М.И. Тарасьев и др. Теоретические основы и технология оптимального микролегирования электростали азотом титаном и алюминием. – Сучасні проблеми металургії. Наукові праці Том 7. – Дніпропетровськ: „Системні технології”, 2005. – 151 с.
8. Леоненков А.В.Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. – СПб.: БХВ – Петербург, 2003. – 736с.: ил.

В.И. Головко, О.Н. Кукушкин, Н.В. Михайловский, А.В. Потапов,
А.Ф. Хасянов, В.В. Смоктий

ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ МЕТАЛЛУРГИИ НА ОСНОВЕ МИКРОВОЛНОВОЙ ТЕХНИКИ

Важнейшим направлением развития металлургии является автоматизация контроля и управления технологическими процессами с применением компьютерной техники. Это определяет возможность достижения значительного экономического эффекта за счет сокращения расхода сырья, топлива, энергии и повышения качества продукции в условиях высокой материало– и энергоемкости металлургических процессов.

Сдерживающими факторами автоматизации в металлургии являются [1] разнообразие технологических процессов и агрегатов доменного и сталеплавильного передела в условиях непрерывного поточного производства при воздействии разнообразных внешних факторов, отсутствии или недостаточном качестве автоматического контроля технологических параметров из-за сложности физико-химических процессов и критических техногенных условий.

Системы контроля уровня материалов в обогатительном, агломерационном, коксохимическом, огнеупорном производствах достигают 90 % всех средств контроля технологических параметров. Степень оснащения оборудования средствами для определения уровня и возможность их использования оцениваются как неудовлетворительные [1]. Подлежит замене, совершенствованию или разработке более 60 % всей номенклатуры существующих средств измерения уровня. Они не отвечают требованиям широкого применения из-за недостаточной универсальности по назначению и диапазону измерений, низкой надежности, инерционности и значительной погрешности измерений, низкой помехозащищенности, радиоактивной опасности и относительно высокой стоимости. По этой причине на металлургических предприятиях затруднено решение вопросов учета, ресурсосбережения и управления запасами сырья.

Дальнейший рост производственных показателей металлургических агрегатов невозможен без внедрения современных информационных технологий, так как наблюдаемость многих параметров не удовлетворяет требованиям управления, а ряд важнейших из них не контролируется из-за отсутствия соответствующей измерительной техники. Развитие информационного обеспечения АСУ ТП в металлургии связано с решением следующих задач [2]:

- замены широко распространенной радиоизотопной техники на экологически чистые средства измерения;

© ГОЛОВКО В.И., КУКУШКИН О.Н., МИХАЙЛОВСКИЙ Н.В., ПОТАПОВ А.В., ХАСЯНОВ А.Ф., СМОКТИЙ В.В., 2006

 ISSN 1991-7848

- профилеметрии засыпи шихты на колошнике доменной печи;
- мониторинга и оперативной оценки динамики состояния поверхности металлургических расплавов для управления конвертерной плавкой, процессов вакуумирования, рафинирования, разливки и транспортирования жидкого металла;
- мониторинга состава, свойств и соотношения металлической, шлаковой и газовой фаз в ходе конвертерной плавки;
- определения крупности компонентов шихты в потоке для формирования ее порций и их смесей;
- оценки влажности огнеупоров с целью рационализации режимов сушки покрытий металлургических агрегатов.

Для решения поставленных задач перспективным в условиях металлургического производства является применение микроволновой техники (МКВ) техники [3]. Преимущества МКВ техники определяются ее быстродействием, бесконтактностью измерений, отсутствием подвижных узлов, возможностью зондирования проводников и диэлектриков, диа–, пара– и ферромагнетиков в широком диапазоне кусковатости материалов (5...300 мм) и их влажности до 100%, независимо от локальных колебаний плотности и химического состава веществ, при безопасной для обслуживающего персонала мощности излучения радиосигнала до 20 мВт.

Использование в МКВ системах для металлургии радиолокационного принципа с качающейся частотой излучения радиосигнала 37,5 ГГц (длина волны 8 мм) определяется незначительным ослаблением мощности радиоизлучения даже при максимальной концентрации (0,25 кг/м^3) металлургической пыли в условиях работы при температуре от –40 до +1700єС (с учетом дополнительной защиты аппаратуры по месту измерения), давлении до 0,4 МПа, разрежении до 1 мбар, количестве отходящих газов до 3000 м^3/мин, а также несущественным влиянием на работу системы атмосферных, промышленных газов, водяных паров и ионизации пылегазовой среды.

Контрольная величина обнаружения отраженного сигнала определена в 80 дБ, ширина диаграммы направленности антенны (по уровню половинной мощности) 6 град, частота девиации в пределах 750 МГц, период модуляции не менее 0,01 с, измеряемое расстояние до 30 м с погрешностью 0,05 м. Разработанный образец радиолокационной системы имеет диаметр апертуры антенны 100 мм, моноблочное исполнение сенсорной и обрабатывающей частей при массе 3 кг. Он отличается автоматическим термостатированием, возможностью оперативного изменения чувствительности, постоянной времени изменения показаний, переградуировки и передачи информации в цифровом виде по интерфейсу RS–485.

Конкретизация параметров радиолокатора базируется на анализе отношения отраженной электромагнитной энергии к излученной $P_{пер.}$ При

одних и тех же значениях $P_{пер}$ и расстояния для различных материалов относительное изменение величины Ro отражательной способности может быть определено отношением значений напряженности отраженного электромагнитного поля $E_{пр}$ принимаемых сигналов. В более простом варианте величина Ro может быть оценена отношением среднеквадратических значений напряжения $U_{пр}$, пропорциональных $E_{пр}$, относительно базового объекта измерения [3].

Проверка технических возможностей системы контроля уровня металлургических материалов выполнена на основе анализа величины Ro материалов при нормальном падении электромагнитной волны [4]. Собственная оценка Ro базовых объектов проводилась относительно напряжения $U_{пр}$. Зависимости $U_{пр}$ от расстояния $H_м$ (в диапазоне от 1 до 10 м) определены для базовых объектов сравнения: (уголкового отражателя – $U_{пр}^{УО}$, металлического экрана – $U_{пр}^{Э}$, бетонной поверхности – $U_{пр}^{Б}$) полиномами третьего порядка (при коэффициенте детерминированности $R^2_д$ = 0,90...0,97) соответственно в виде

$$U_{пр}^{УО} = 0{,}0038\ H_м^3 - 0{,}141\ H_м^2 + 0{,}921\ H_м + 0{,}136\ , \quad (1)$$

$$U_{пр}^{Э} = 0{,}0032\ H_м^3 - 0{,}073\ H_м^2 + 0{,}430\ H_м + 0{,}246\ , \quad (2)$$

$$U_{пр}^{Б} = 0{,}0032\ H_м^3 - 0{,}006\ H_м^2 + 0{,}348\ H_м + 0{,}092\ . \quad (3)$$

Установленные значения Ro металлургических материалов превышают значение 0,001 (–60 дБ), что определяет возможность приема отраженных радиосигналов на расстояниях до 10 м. Аналогичные результаты получены для кокса, агломерата и окатышей при увеличении до 40є угла падения радиолуча на поверхность сыпучего материала. Важным результатом является также возможность идентификации вида иследуемых материалов.

Влияние пылевой помехи на процессы радиолокации моделировалось на бункерной установке с расстоянием до цели 5,5 м. Пылевая помеха представляла смесь железорудного концентрата, угольной и колошниковой пыли, которая подавалась воздушным потоком (концентрация пыли достигала 300 г/м^3) поперек направления радиолуча. Установлено [4], что погрешность измерения расстояния в этих условиях не превышала 0,05 м, хотя наблюдалось эпизодическое снижение амплитуды отраженного сигнала (в среднем на 5 дБ).

Исследования радиолокации при динамическом состоянии объекта отражения выполнены на стендовой установке по поверхности модельной жидкости (2% водный раствор поваренной соли). Амплитуда колебаний этой поверхности доводилась до 6 см, а характер волнения до хаотичного, то есть имитировались критические условия отражения радиоволн. Установлено [5], что снижение погрешности определения расстояния достигается сужением спектрального окна наблюдения радиолокационной обстановки с одновременной компенсацией помехи в общем спектре.

Опробование контроля уровня в промышленных условиях реализовано в бункерах, угольных силосах и шахтной печи обжига известняка, заполненных ферросплавами, агломератом, магнезитом, известняком,

флюоритом, известью, доломитовой мукой и газовыми углями. В результате установлено [6], что радиолокация обеспечивает надежное измерение уровня сыпучей среды на расстоянии до 30 м при температурах до 350°С, кусковатости 0...300 мм, углах откоса до 50є и запыленности до 30 г/м^3. В статическом состоянии сыпучего тела разница в показаниях расстояния радаром и механическими замерами не превышала 0,05 м. При движении материалов максимальная погрешность достигала 0,3 м (для доломитовой муки), что было вызвано резкими изменениями поверхности из-за просадки и осыпи откосов.

Классификация высоты кусков $h_к$ для контроля крупности сыпучих материалов на конвейере решалась путем тонкого анализа формы составляющих амплитудно-частотного спектра ($U_{пр}$, средневзвешенная частота $f_{ср}$, дисперсия m_2, асимметрия m_3 и эксцесс m_4, относительная асимметрия b_1 и эксцесс b_2, а также коэффициента вариации n и доплеровского сдвига частоты $f_д$). Определение значений $h_к$ по $f_д$ при перемещении куска материала конвейером (с частотой вращения $n_б$ и радиусом $R_б$ барабана) выполнялось по разнице скоростей $V_{дм}$ (рис. 1)

$$V_{дм} = V_д - V_{дб} = 2\pi n_б \left[(R_б - h_к)\cos\alpha_q - R_б \cos\alpha_б \right], \qquad (4)$$

где α_q – угол между направлением доплеровских скоростей $V_д$ точек материала высотой $h_к$ и соответствующих линейных скоростей $V_л$, $\alpha_q = 90° - (\alpha_ц - \rho_д - \alpha_д)$; $\alpha_б$ – угол между направлением доплеровских скоростей $V_{дб}$ точек поверхности барабана и соответствующих им линейных скоростей $V_{лб}$, $\alpha_б = 90° - (\alpha_ц - \rho_д)$; $\rho_д = 90°-\alpha_0$; $\alpha_д$ – ширина диаграммы направленности антенны (ДНА).

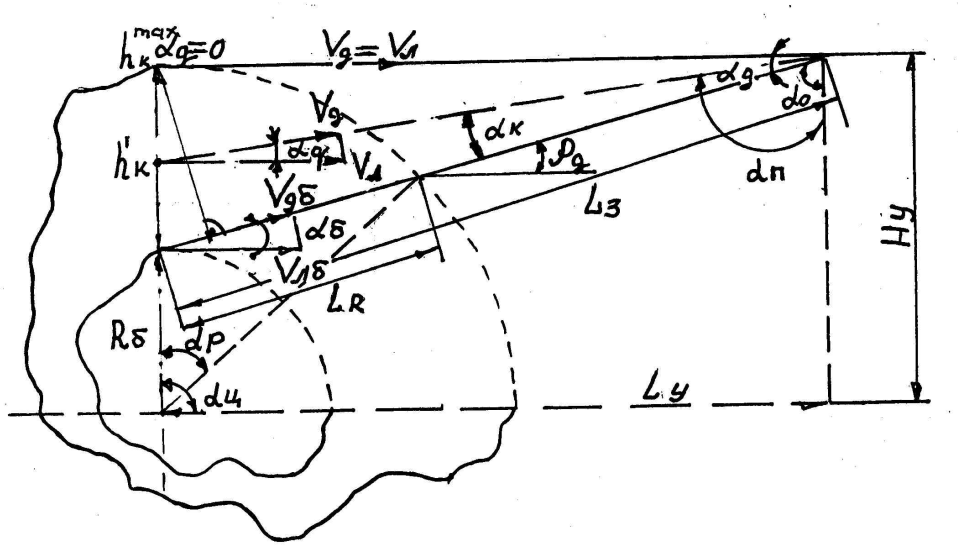


Рисунок 1 - Разница доплеровских скоростей в пределах диаграммы направленности антенны $\alpha_д$

Из-за изменения направления вектора скорости $V_л$ одной и той же точки куска $h_к$ на угле $\alpha_д$ с изменением доплеровской скорости до

величины $V'_{дм} = 2\pi \cdot n_б \cdot (R_б + h_k) \cdot \cos\alpha_б$ предпочтительным является определение размера куска в момент его появления в угле $\alpha_ц$. Тогда при $L_з = const$ и максимальном размере куска h_{max} можно определить в указанный момент времени угловые положения α'_k в ДНА при данных величинах h'_k из равенства

$$h'_k \cdot \sin(\alpha_ц + \alpha'_k - \rho_д) / \sin\alpha_k = h_{max} \cdot \sin(\alpha_ц + \alpha_д - \rho_д) / \sin\alpha_д . \quad (5)$$

В результате с учетом (4), (5) и выражения $V_д = f_д \cdot c / (2 \cdot f_{изл}) = f_д / 250$ ($f_{изл}$ = 37,5 ГГц, $c = 3 \cdot 10^8$ м/с) при совмещенном излучателе и приемнике, неподвижных относительно перемещающегося объекта, градуировка системы определится зависимостью

$$f'_д = 500 \cdot \pi \cdot n_б (R_б + h'_k) \cdot \sin(\alpha_ц - \rho_д + \alpha'_k) . \quad (6)$$

Согласно (6), эпюре величин h'_k материала соответствует положение спектральных линий сигнала. Однако, мониторинг точек кусков, одновременно находящихся в пределах ДНА, проблематичен из-за неоднозначности оценки величины h'_k. Этот недостаток был исключен применением селекции частотных составляющих в процессе анализа измерения радиосигнала.

Проверка разработанного способа радиолокационной кускометрии выполнена в режиме реального времени с применением имитаторов движущегося материала. Использование параметра $f_д$ для определения h'_k проверено по рельефной поверхности с выступами высотой 35 мм, расположенными на расстоянии 50 мм друг от друга по окружности барабана (скорость вращения 1,7 м/с). Основой алгоритма является определение момента увеличения максимальной частоты $f_д$ текущего спектра по сравнению с предыдущим. Установлено, что погрешность фиксации высот профилированной поверхности (на расстоянии до 3,5 м от оси барабана) не превышала 5 мм.

Опробование на реальном материале (кокс фракций 20...40 мм; 40...80 мм; 80...120 мм) выполнено при моделировании прямолинейного движения кусков кокса (линейная скорость 0,78 м/с) на карусельном имитаторе диаметром 1,3 м. Использовалась микроволновая система (апертура антенны 40 мм), расположенная вертикально на расстоянии 0,2 м от поверхности кокса с целью снижения потерь энергии и минимизации пятна радиолуча на зондируемой поверхности. Установлено [7], что характеристики радиосигнала и форма его спектра существенно зависят от движущихся фракций кокса. Увеличение значений $U_{ск}$, $f_{ср}$, b_1, b_2, n однозначно связано с увеличением фракций кокса. Наиболее чувствительным параметром для четкой идентификации фракций кокса является относительная асимметрия b_1, средняя величина которой для заданных фракций кокса составляла соответственно – 0,49; 0,82 и 1,23.

 ISSN 1991-7848

Профилограмма поверхности засыпи шихты в доменных печах (ДП) определяется последовательностью точек с координатами X_i, Y_i вдоль линии сканирования. В режиме прямой видимости величины X_i и Y_i , с учетом текущих значений угла поворота $\alpha_{пi}$ сенсорного блока (СБ) системы и измеренного расстояния H_{pi} , равны

$$\begin{cases} X_i = R_п - \Delta x - H_{pi} \cdot \sin(\alpha_{пi} + \psi_н), \\ Y_i = H_{pi} \cos(\alpha_{пi} + \psi_н) - \Delta y, \end{cases} \quad (7)$$

где $R_п$ – радиус колошника доменной печи; Δx, Δy – расстояние от оси вращения СБ до стенки печи и нулевого уровня засыпи шихты; $\psi_н$ – начальный угол установки СБ относительно вертикали.

Для расширения обзора поверхности засыпи в стесненных условиях колошника ДП предложено использовать переотражатель радиосигнала [8]. Расчет координат X_i, Y_i выполнен с использованием плоского переотражателя с учетом мнимой оси вращения СБ, образованной пересечением радиолучей за поверхностью переотражателя и соответствующей корректировки значений Δx, Δy (рис. 2)

$$\begin{aligned} \Delta x' &= \left(\Delta x \pm l_x \mp h_{пер} \cdot \operatorname{ctg} \gamma_п\right) \cdot \left(1 - \cos 2\gamma_п\right) - \Delta x, \\ \Delta y' &= \Delta y - \left(\Delta x \pm l_x \mp h_{пер} \cdot \operatorname{ctg} \gamma_п\right) \cdot \sin 2\gamma_п, \end{aligned} \quad (8)$$

где $h_{пер}$ – расстояние по вертикали от точки подвеса переотражателя до оси вращения СБ (на рис. 2 – $h_{пер} = 0$); $\gamma_п$ – угол наклона переотражателя относительно горизонтали; l_x – расстояние по горизонтали от стенки печи до точки подвеса переотражателя.

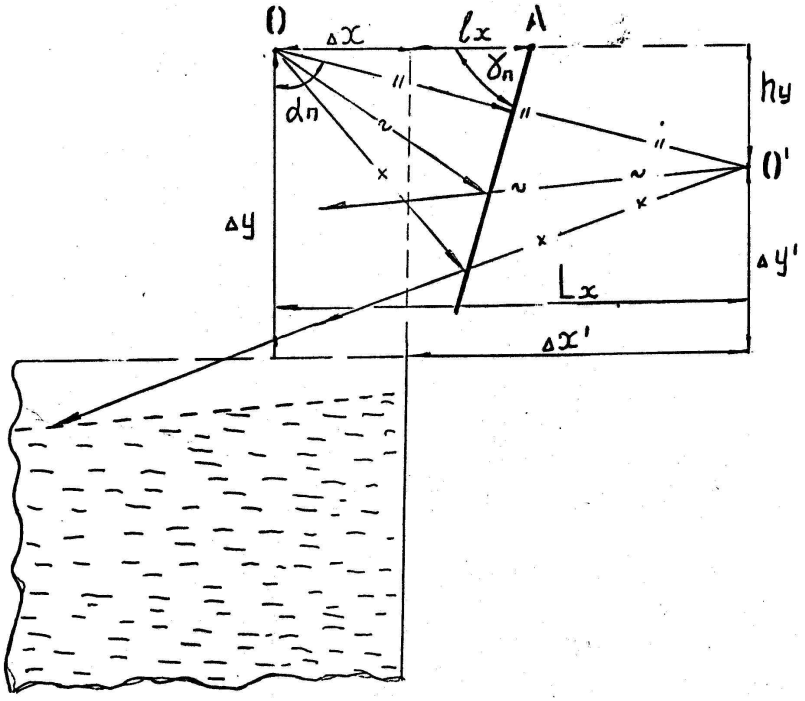


Рисунок 2 - Определение профиля поверхности с переотражателем радиосигнала

Информация о профиле поверхности используется далее для расчетов скорости схода и толщины слоев шихты, рассогласования фактического и заданного профилей поверхности засыпи, ее углов откоса, вида материала и поверхностной его неравномерности. Скорость схода шихты в заданных точках диаметра печи определялась отношением приращения значений ординат Y_i начального и последующих профилей засыпи каждой порции шихты к времени между их измерением, толщина слоя – по разнице значений Y_i ее начального профиля и заключительного профиля предыдущей порции шихты, а величина рассогласования – по разнице значений Y_i начального и заданного профилей поверхности засыпи каждой порции шихты.

Расчет углов откоса поверхности материала основан на определении групп значений X_i, Y_i, характеризующих тенденцию формирования этих углов при заданной технологической погрешности J_k. При выполнении условия $\Delta Y = |Y_2 - Y_1| \le J_k$ величины Y_2 и Y_1 усредняются. Значение среднего арифметического $Y_{2ср}$ сравнивается с последующей величиной Y_i. Усреднение продолжается до момента нарушения этого условия, что определяет первую группу n значений Y_i с усредненной величиной $Y_n^{ср}$ на участке $\Delta X_n = X_n - X_0$. Аналогичным образом формируются последующие группы чисел Y_i, разность усредненных значений J_k и очередной величины ординаты которых превышает значение J_k. Отношение разницы усредненных значений Y_i предыдущего и последующего участков к длине этого участка профиля определяет тангенс угла $\gamma_{ні}$ откоса поверхности.

Вид материалов на поверхности засыпи шихты устанавливается [9, 10] в процессе сравнения по ходу сканирования текущей величины $U^i_{пр}$ с предварительно полученными значениями этого параметра (в качестве эталонного) при соответствующих углах скольжения β^i_c и расстоянии H^i_p. Достижение равенства при сравнении величины $U^i_{пр}$ определяет вид материала. При этом

$$\beta^i_c = \arccos\left[(H^i_p)^2 + (C^i_u)^2 - (H^{i-1}_p)^2 \Big/ 2 \cdot H^i_p \cdot C^i_u\right], \qquad (9)$$

$$C^i_u = \sqrt{(H^{i-1}_p)^2 - 2 \cdot H^{i-1}_p \cdot H^i_p \cdot \cos\ \alpha_{ni} + (H^i_p)^2}\ . \qquad (10)$$

Оценка поверхностной неравномерности засыпи шихты основана на анализе радиусов описанных окружностей кривой выпуклостей и впадин поверхностных кусков материала. Каждый элемент кривой можно представить частью окружности с радиусом R^k_i, определяемой по каждым трем последовательным значениям X_i, Y_i с величиной приращений ΔX_i, ΔY_i. Радиус $R^k_i = D_i / (2 \cdot \sin \psi^k_i)$ описанной окружности с хордой D_i и дугой ψ^k_i определяется с учетом выражений (рис. 3)

$$\psi^k_i = \arccos\ (\ G^2_i + G^2_{i+1} - D^2_i / 2 \cdot G_i \cdot G_{i+1}), \qquad (11)$$

 ISSN 1991-7848

$$G_i = \sqrt{\Delta X_i^2 + \Delta Y_i^2};\ G_{i+1} = \sqrt{\Delta X_{i+1}^2 + \Delta Y_{i+1}^2}, \quad (12)$$

$$D_i = \sqrt{(\Delta Y_i + \Delta Y_{i+1})^2 + (\Delta X_i + \Delta Y_{i+1})^2}. \quad (13)$$

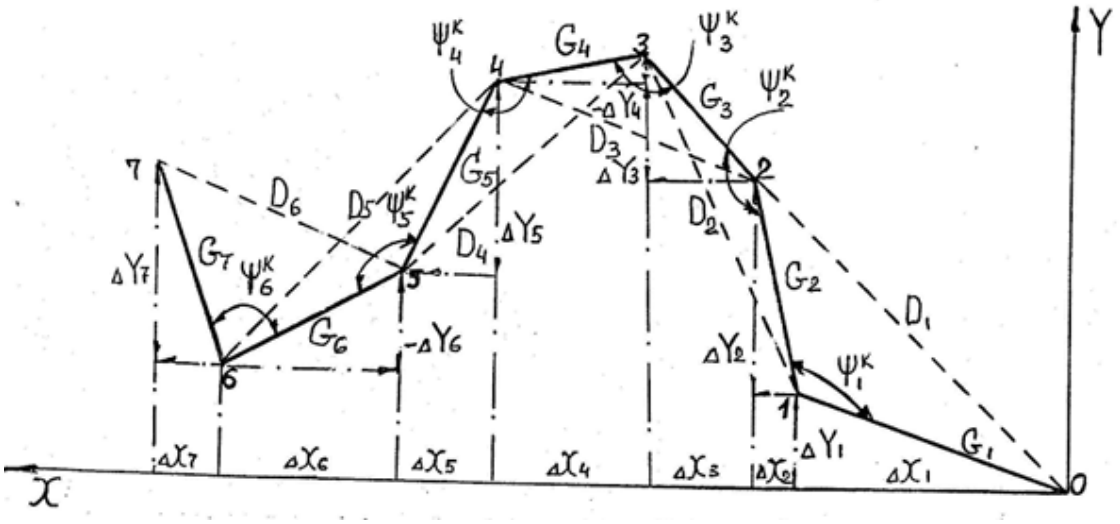


Рисунок 3 - Определение поверхностной неравномерности материала

В результате анализа экспериментальных данных сканирования поверхности шихтовых материалов установлено, что применение микроволновой локации является технически реализуемым и перспективным. Уверенное определение профиля поверхности шихты достигается с погрешностью измерения меньше допустимой величины (0,2 м), при углах скольжения радиолуча ≥15 град и колебаниях углов откоса на отдельных участках поверхности от −50 до +40 град.

Характер изменения величины $U_{пр}$ демонстрирует четкое отличие кокса от рудной части шихты для определения вида материала. Время сканирования не является ограничивающим фактором при работе радиолокационной системы, что установлено при снижении периода сканирования с 88 с до 2,4 с.

Выполненное опробование автоматизированного режима работы макета профилемера для доменной печи объемом 1513 м^3 комбината «Запорожсталь» с применением плоского переотражателя определило, что абсолютное отклонение расстояния при радиолокационном и метрическом измерении составило 0,029 м (при допуске 0,1 м), а расчетные углы откоса материала соответствовали фактическим.

Однако, стесненные условия колошника ДП не позволят реализовать большую зону сканирования, а установить в рабочем пространстве ДП переотражатель невозможно. Поэтому с учетом полученных результатов разработан профилемер веерного типа. Определение профиля засыпи шихты в этом варианте обеспечивается по результатам мониторинга уровня шихты в отдельных зонах по двум взаимно перпендикулярным диаметрам колошника печи.

Промышленные испытания радара с целью профилеметрии впервые проведены на доменной печи объемом 5000 м^3 комбината «Криворожсталь» [11]. Установлено, что устойчивый отраженный радиосигнал достоверно характеризует уровень засыпи шихты. Зафиксированный диапазон изменения глубины воронки засыпи (по оси печи) изменялся от 0 до 8 м относительно нулевого уровня шихты. Полученные данные соответствуют существующим технологическим представлениям о ходе доменной плавки. Технические характеристики радара и средств его защиты позволяют успешно использовать его в составе автоматизированной системы определения профиля поверхности [12].

Возможность определения уровня расплава в конвертере для создания динамической АСУ плавкой основана на результатах опробования радиолокации в ходе экспериментальных плавок на 1,5-тонном конвертере ИЧМ НАНУ. Измерениями установлено, что по спокойной ванне погрешность измерения не превышала 0,05 м, а при ее вспененном состоянии – 0,2 м. С учетом результатов опробования основными требованиями к функционированию системы в промышленных условиях определены: погрешность измерения по спокойной ванне – не хуже 0,05 м, измеряемое расстояние – до 30 м, установка СБ в теплопылезащитном устройстве по условиям эксплуатации (механические воздействия, температура расплава – до 1700°С, запыленность – до 200 г/м^3, длительность продувки – до 20 мин).

Промышленные испытания системы проведены на 150-тонном конвертере Челябинского металлургического комбината [13]. В результате исследований установлено, что системой однозначно фиксировались все изменения положения конвертера при устойчивом по расстоянию и мощности радиосигнале. Погрешность измерения по днищу футеровки конвертера и реперным точкам (срез горловины, днище перевернутого конвертера) не превышала 0,03 м. Достоверно определялся износ футеровки по мере увеличения количества плавок, а также уровень зеркала спокойной ванны после заливки чугуна и во время выдержки плавки. Положение кислородной фурмы и изменение расхода кислорода в диапазоне от 200 до 400 м^3/мин (на порожнем конвертере в горячем состоянии и после завалки металлолома), а также интенсивное образование густого бурого дыма, высокой запыленности, наличие факела и россыпи искр не оказывает существенного влияния на показания расстояния, а отраженный от объекта зондирования радиосигнал значительно превышает уровень этих помех. С учетом полученных результатов положение кислородной фурмы в дальнейшем устанавливалось оператором по глубине металлической ванны, определяемой как разность расстояний до зеркала спокойной ванны (перед сливом металла) и до поверхности шлака (после выпуска стали).

Исследование работы радиолокационной системы при продувке конвертерной ванны обеспечивалось решением задач анализа спектральных, энергетических и статистических характеристик

радиосигналов. В результате установлено, что кривые изменения уровня ванны достоверно отражают ход плавки и в достаточной степени отвечают существующим представлениям и визуальным наблюдениям. Надежность информации об уровне вспененной ванны была определена соответствием показаний системы на отметке среза горловины конвертера при выбросах и переливах шлака. Четко фиксировались моменты остановки продувки (например, при перегреве котла–утилизатора). Однозначно отслеживалось изменение уровня из-за реакции вспененной ванны на управляющие воздействия (подача сыпучих материалов, изменение расхода кислорода и положения фурмы). При сильно вспененной ванне эффективность воздействий снижается: ванна достаточно быстро возвращается в прежнее вспененное состояние. Уверенное определение уровня ванны в процессе ее вспенивания достигается в диапазоне уровня до 1 м от среза горловины.

Для оперативного представления информации в режиме реального времени, прогноза выбросов расплава из конвертера, а также с целью повышения чувствительности и обеспечения контроля функционирования системы она была оснащена ПЭВМ. Прогноз управляющих воздействий осуществлялся на основе равенства прогнозируемого времени $t_{сп}$ на заполнение расплавом свободного пространства конвертера и заданного времени $t_т$ управляющих воздействий. Величина $t_{сп}$ является следствием изменения уровня $H_т$ и скорости $V_т$ уровня расплава.

Внедрение этого способа [14] обеспечило возможность осознанного выбора оператором технологического воздействия по управлению уровнем расплава в функциональной связи с конкретными технологическими условиями плавки на основе отображения хода продувки в реальном времени.

Характерная кривая процесса продувки приведена на рис. 4. Измерение уровня ванны в этом случае осуществлялось после начала продувки. Отличием этой плавки является интенсивное кипение расплава после продувки и его осаждение. Положительные результаты эксплуатации системы предопределили оснащение аналогичными системами 300-тонных конвертеров строящегося цеха меткомбината «Запорожсталь».

Микроволновый мониторинг процесса шлакообразования проводился для определения мощности отраженного сигнала [15]. Зондирование ванны осуществлялось на 0,3–тонном конвертере ИЧМ НАНУ с пассивным переотражателем над горловиной конвертера для изменения направления радиолуча с горизонтального на вертикальное. Для получения шлаков с различными физико–химическими свойствами варьировали параметры дутьевого режима в широком диапазоне, доводя ход продувки до выбросов.

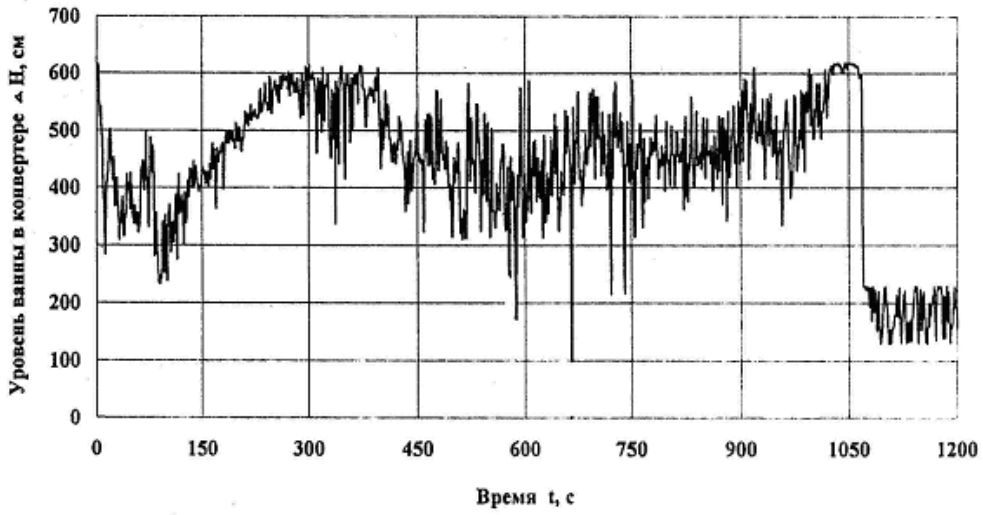


Рисунок 4 - Изменение уровня расплава по ходу плавки

Анализ связи параметров радиолокационного зондирования с характеристиками шлаков проводился по величине Ro. Установлено, что величина Ro при локации поверхности жидкого чугуна практически соответствует значению ее для металлического листа. Выбросы из конвертера продуктов плавления возникают при величине $Ro < 0,3$, что может служить определенным критерием хода плавки. Согласно полученным регрессионным зависимостям Ro (при коэффициенте корреляции не ниже 0,8) с увеличением в шлаке содержания $Fe_{общ}$ коэффициент отражения шлака снижается. Это соответствует параметрам дутьевого режима плавок, приводящих к увеличению склонности шлака к вспениванию и выбросам по ходу продувки [15].

Коэффициент отражения шлака имеет тенденцию к уменьшению при увеличении содержания компонентов, разжижающих шлак и способствующих его обезуглероживанию и вспениванию. Вместе с этим, при увеличении содержания основных окислов отражение радиосигналов возрастает. Интенсивность отражения радиосигналов от шлака уменьшается при снижении поверхностного натяжения, температуры плавления и плотности. Таким образом, с достаточно высокой вероятностью величина отраженного сигнала может комплексно характеризовать состав, свойства, состояние конвертерного шлака и, следовательно, ход плавки. Полученные зависимости определены на четырех опытных плавках и требуют уточнения в ходе промышленных экспериментов.

Характерной особенностью при ковшевой вакуумной дегазации металла является интенсивное вспенивание расплава с резким изменением его уровня и выбросами из ковша. В этой связи контроль уровня расплава является важнейшим условием нормального протекания процесса (особенно при недостаточном запасе высоты «свободного» борта ковша). С учетом отмеченных особенностей, исходные параметры системы контроля уровня были получены путем математического моделирования до пуска комплекса

 ISSN 1991-7848

вакуумирования стали для ОАО «Нижнеднепровский трубопрокатный завод» (НДТЗ).

При моделировании поведения расплава установлено: при времени вакуумирования до 6 мин и подаче аргона в интервале от 50 до 200 л/мин изменение уровня металла в ковше (только при учете удаления водорода) колеблется от 0,22 м до 0,91 м. При уменьшении запаса высоты «свободного» борта ковша до 0,5 м процесс вакуумирования становится критическим. Рациональным управлением является резкое увеличение давления в вакуум–камере, что вызовет снижение уровня расплава (по меньшей мере на 0,12 м) и затем набор вакуума до заданной величины при одновременном снижении расхода аргона с 200 л/мин до 40 л/мин. При максимальной скорости подъема ванны ($\nu_п$ = 5 мм/с) и величине $\tau_{уп} = T_{уп}$ (принята равной 5 с) допустимая погрешность системы составляет 0,09 м.

Модернизированный образец радиолокационной системы с опорным каналом для снижения погрешности измерения был внедрен на НДТЗ в составе комплекса вакуумирования стали [16]. Привязку всех элементов системы к объекту по нашему заданию выполнила фирма MESSO (Германия) как поставщик основного оборудования. Погрешность измерения уровня составляла не более 0,02 м. Для уменьшения помех система включала пространственную фильтрацию (угол раскрыва диаграммы направленности антенны 3°), аналоговую фильтрацию сигналов по расстоянию до 1,5 м, узкополосный спектральный анализ, корректировку расстояния по заданным точностным характеристикам опорного канала.

Радиолокационная система определения уровня в промежуточном ковше (промковше) была опробована на машине непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) Днепровского меткомбината. Измерения выполнялись с ретрансляцией сигналов под углом 90° относительно горизонтальной оси СБ. Диапазон измеряемых расстояний 2,5...4,0 м. Погрешность измерения не превысила 0,03 м. Динамика уровня расплава в промковше соответствовала управляющим воздействиям. Так, при переходе разливки металла с одного стальковша на другой показания системы четко идентифицировали изменение и последующую стабилизацию уровня в промковше.

На основе апробированных решений по применению радиолокации металлургических расплавов разработана также установка для контроля чугуна в миксеровозах меткомбината «Запорожсталь» с целью контроля износа футеровки горловины и подины.

Определение влажности микроволновыми методами исследовалось для контроля сушки футеровки стальковшей (через выпарные отверстия). Макетный образец измерителя влажности (частота излучения 37,5 ГГц, апертура антенны 40 мм) был изготовлен по схеме СВЧ–влагомеров с опорным каналом и автоматическим поддержанием постоянства коэффициента усиления измерительного канала. В соответствии с

условиями применения измерителя в металлургии в основном исследовалась возможность определения влажности (до 15 %) при отражении радиосигнала от материала. В качестве материалов использовались темплеты (с гранями не менее 50 мм и толщиной 20 ± 2 мм) шамотного пенолегковеса типа ШЛ–04, глины марки ПЛГ-2, шамотного и силикатного кирпичей при изменении расстояния (до 400 мм) и угла их наклона (до 30°) относительно оси антенны.

В результате исследований установлено [17], что диапазон определяемой измерителем влажности не превышает 14 %, что связано с предельной его чувствительностью (60 дБ). При 5 %-ной влажности величина относительной погрешности ее измерения составляет 1,2 %, а при 13,4 %-ной влажности – 1,1 %, что не противоречит ее рекомендуемым величинам.

Наиболее приемлемым решением является подвод МКВ излучения непосредственно в зону контроля влажности с использованием волновода (сечением 7,2 × 4,0 мм^2) вместо антенны. В этом варианте устойчивый прием отраженного сигнала наблюдается на расстоянии до 4 мм при углах наклона до 5°. Относительная ошибка измерений не более 1,1 %.

Результаты исследований и промышленные испытания обеспечили решение важной научно-технической проблемы создания радиолокационных систем контроля технологических параметров для замены радиоизотопной техники на экологически чистые средства для измерения уровня материалов в бункерах, профилеметрии засыпи шихты на колошнике доменной печи, анализа динамики расплавов при управлении конвертерной плавкой и вакуумированием сталеразливочных ковшей. Разработаны принципы анализа взаимосвязи состава, свойств и соотношения металлической, шлаковой и газовой фаз конвертерной ванны, определения крупности компонентов шихтовых материалов в потоке и оценки влажности огнеупорного покрытия при сушке разливочных ковшей.

Полученные результаты использованы в проектах сталеплавильного комплекса металлургического комбината “Запорожсталь”, капитального ремонта доменных печей комбинатов “Криворожсталь”, “Запорожсталь”, “Азовсталь”.

Разработка и постановка на производство радиолокационного дальномера–уровнемера РДУ–Х2 обеспечивает расширение и углубление информационного обеспечения металлургических процессов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Котов К.И., Шершевер М.А. Средства измерения, контроля и автоматизации технологических процессов, вычислительная микропроцессорная техника. – М.: Металлургия, 1989. – 496 с.
2. Возможности использования микроволновых методов измерения для контроля технологических процессов в черной металлургии / В.И. Головко, О.Н. Кукушкин, В.В. Смоктий и др. // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 1995. – № 3. – С. 11–13.

3. Разработка и применение средств радиолокационного контроля технологических процессов / А.Г. Величко, В.И. Головко, О.Н. Кукушкин и др. // Сб. науч. тр. Национальной горной академии Украины. – № 11. – Том 2. – Днепропетровск: РИК НГА, 2001. – С. 177–180.
4. Определение отражения микроволнового излучения металлургическими материалами / О.Н. Кукушкин, В.И. Головко, В.В. Смоктий и др. // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: Сб науч. трудов. – К.: Наукова думка, 1995. – С. 171–175.
5. Возможности микроволновой техники для зондирования металлургических расплавов / О.Н. Кукушкин, В.И. Головко, Н.В. Михайловский и др. // Труды IX МНТК "Теория и практика кислородно-конвертерных процессов". Минпром Украины. – Днепропетровск.: ГМетАУ, 1998. – С. 15–16.
6. Оценка с помощью СВЧ-техники запасов сыпучих материалов в бункерах металлургических производств / В.И.Головко, О.Н.Кукушкин, Н.В.Михайловский и др. // Науч.-техн. сб.: Электронная техника. – Сер. 1, СВЧ-техника. – Вып. 1 (471). – М.: ЦНИИ "Электроника", 1998. – С. 48–50.
7. Исследование возможности определения гранулометрического состава материалов в потоке методами микроволновой техники / О.Н.Кукушкин, В.И.Головко, Н.В.Михайловский и др. // Науч.-техн. сб.: Электронная техника. – Сер. 1, СВЧ-техника. – Вып. 1 (471). – М.: ЦНИИ "Электроника", 1998. – С. 39–45.
8. Головко В.И. Определение профиля поверхности сыпучих материалов с помощью радара // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2000. – № 6. – С. 15–17.
9. Радарный контроль крупности материала на конвейере / А.Г. Величко, В.И. Головко, О.Н. Кукушкин, Н.В. Михайловский // Матеріали міжнародної конференції «Форум гірників – 2005», том 1. – Д.: НГУ, 2005. – С. 156–169.
10. Спосіб визначення параметрів засипки шихти в доменній печі: Деклараційний патент України на винахід № 43970А, МПК7 С21В7/24, G01R27/04 / О.Н.Кукушкін, В.І.Головко, М.В.Михайловський та ін. // Заявка №2000084615 від 01.08.2000; Оприлюднено 15.01.2002, бюл. № 1, 2002 р.
11. Испытания радиолокационной измерительной системы уровня засыпи шихты на доменной печи № 9 КГГМК "Криворожсталь" / В.И.Головко, А.А.Дударенко, Н.В.Михайловский и др. // Сборник научных трудов НГУ № 17, том 2. – Днепропетровск: РИК НГУ, 2003. – С. 292–295.
12. Спосіб завантаження матеріалів в доменну піч: Деклараційний патент України на корисну модель № 2996, МПК7 С21В7/20 / В.І.Головко, О.М.Кукушкін, М.В.Михайловський та ін. // Заявка № 2004032335 від 30.03.2004; Оприлюднено 15.09.2004, бюл. № 9, 2004 р.
13. Промышленная эксплуатация системы измерения конверторной ванны на основе СВЧ-техники / В.В. Смоктий, В.И. Головко, А.Ф. Хасянов и др. // Труды 2-го конгресса сталеплавильщиков. – М.: Черметинформация, 1994. – С. 101–102.
14. Спосіб прогнозування керуючих дій у конвертері: Деклараційний патент України на винахід № 59270 А, МПК7 С21С5/30 / О.Г. Величко,

О.М. Кукушкін, В.І. Головко та ін. // Заявка №20021210424 від 23.12.2002; Оприлюднено 15.08.2003, бюл. № 4, 2003 р.

15. Исследование принципиальной возможности микроволнового мониторинга состава и свойств конвертерного шлака / В.В. Смоктий, В.И. Головко, Л.А. Головко и др. // Науч.-техн. сб.: Электронная техника. – Сер. 1, СВЧ-техника. – Вып. 1 (471). – М.: ЦНИИ "Электроника", 1998. – С. 25–30.
16. Контроль уровня расплава в ковшевом вакууматоре / В.В.Смоктий, В.И.Головко, В.К.Гулый и др. // Сталь. – 1996. – № 12. – С. 20–21.
17. Определение влажности огнеупорных металлургических материалов микроволновым скатерометром / В.И. Головко, А.В. Потапов, О.Н. Кукушкин и др. // Науч.-техн. сб.: Электронная техника. – Сер. 1, СВЧ-техника. – Вып. 1 (471). – М.: ЦНИИ "Электроника", 1998. – С. 32–39.

 ISSN 1991-7848

УДК 621.3.032

В.А. Тутык

ИМПУЛЬСНЫЕ ГАЗОРАЗРЯДНЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ ПУШКИ ДЛЯ НИЗКОВАКУУМНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Приводятся результаты экспериментальных исследований вольт-амперных характеристик, созданных газоразрядных электронных пушек ЭГП-6 и высоковольтной – ЭГП-14 с полым анодом и холодным катодом для низко вакуумных технологий в диапазоне давлений ниже P <1200 Па, при ускоряющих напряжениях U_u<100 кВ. Максимальная мощность инжектируемого электронного пучка в импульсе составляла $N_u \le 10^6$ Вт.

Приводяться результати експериментальних досліджень вольт-амперних характеристик, створених газорозрядних електронних гармат ЭГП-6 і високовольтної – ЭГП-14 з порожнім анодом і холодним катодом для низько вакуумних технологій в діапазоні тисків нижче P <1200 Па, при прискорювальних напругах U_u<100 кВ. Максимальна потужність інжектируємого електронного пучка в імпульсі становила $N_u \le 10^6$ Вт.

Results of experimental researches volt-амперных of the characteristics, created gas-discharge electronic guns ЭГП-6 and high-voltage - ЭГП-14 with the hollow anode and the cold cathode for low vacuum technologies in a range of pressure below P <1200 Па, at accelerating voltage Uu <100 кВ. The maximal capacity of an injected electronic beam in an impulse made $N_u \le 10^6$ Вт.

1.Введение

Импульсные электронные пучки представляют практический интерес для реализации разнообразных низковакуумных электронно-лучевых технологических процессов: инженерии поверхности материалов, плазмохимических технологий, получения покрытий, диагностики и визуализации газовых потоков, ионизации и возбуждения газовых потоков, нагревания поверхностей изделий, испытания теплозащитных покрытий и многих других [1...6]. Традиционная электронно-лучевая техника, используемая для решения подобных задач, требует наличия в системе вывода электронного пучка в рабочую среду сложной дифференциальной откачки. Основные трудности при реализации низковакуумных электронно-лучевых технологий заключается в том, что получение электронных пучков осуществляется в высоком вакууме при давлениях ниже 10^{-2} Па, а их использование – в низком при давлениях выше 10 Па. В связи с этим возникает задача создания импульсных электронных пушек, работающих в низком вакууме в диапазоне давлений 10...1000 Па и ускоряющих напряжениях 2...100 кВ. Перспективным путем ее решения является применение газоразрядных электронных пушек с холодным катодом и полым анодом (ЭГП), работающих на принципе извлечения электронного пучка из высоковольтного тлеющего разряда (ВТР) при давлениях *P<10 Па*

© ТУТЫК В.А., 2006

[1, 2] и создание на их основе низковакуумных газоразрядных электронных пушек [7].

2.Постановка задачи

Целью работы является проведение исследований физических процессов, протекающих в ЭГП, выявление закономерностей, влияющих на повышение их рабочего давления и создания на этой основе конструкций низковакуумных ЭГП для низковакуумных электронно-лучевых технологий.

3. Низковакуумная газоразрядная электронная пушка ЭГП-6

Для реализации поставленной задачи была создана конструкция газоразрядной электронной пушки ЭГП-6 с холодным катодом, работающая на основе извлечения электронного пучка из высоковольтного тлеющего разряда (ВТР).

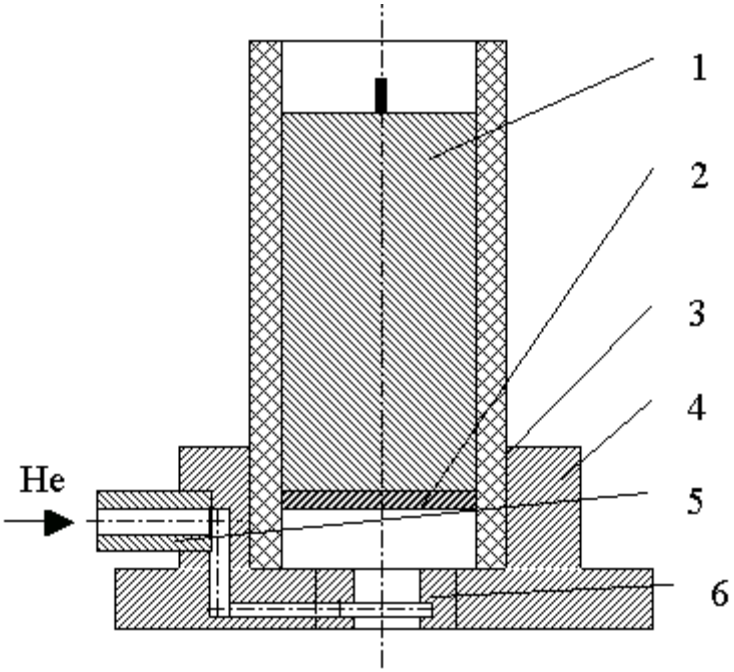
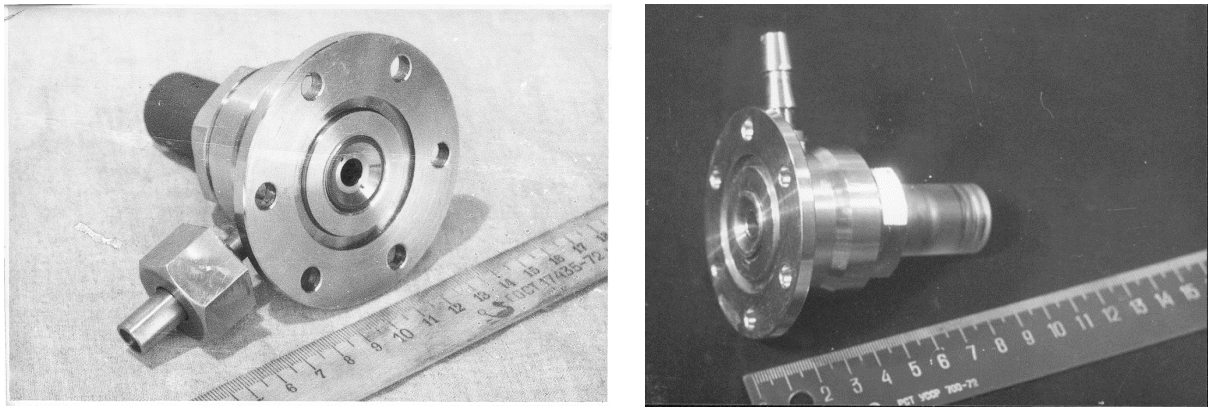


Рисунок 1 - Схема газоразрядной электронной пушки ЭГП-6

Она состоит (рис.1) из следующих основных элементов: катодного узла – 1; катодной вставки -2; высоковольтного изолятора – 3; корпуса анода -4; системы поддува рабочего газа (He); анодной вставки – 6. При работе электронной пушки анод заземляется, а на катод подается высокое напряжение. Электрическая прочность изоляция между анодом и катодом обеспечивается с одной стороны конструкцией высоковольтного керамического изолятора, а с другой – создания условий работы в междуэлектродном промежутке в области левой ветви кривой зажигания Пашена. После подачи высокого напряжения на электронную пушку в области анодного отверстия зажигается высоковольтный тлеющий разряд. Электрическое поле между анодом и катодом сформировано таким образом, что наиболее благоприятные условия зажигания ВТР осуществляются

 ISSN 1991-7848

вдоль осевой линии. Ионы разряда двигаются к катоду и выбивают из него вторичные электроны, которые ускоряются в между электродном промежутке анод-катод и в виде электронного пучка выходят из анодного отверстия за пределы электронной пушки в технологическую зону. На своем пути быстрые электроны пучка ионизируют рабочий газ, образуя новые ионы и медленные электроны. Последние двигаются к аноду и компенсируют заряд, ушедших из пушки электронов пучка. Общий вид ЭГП-6 двух модификаций приведен на рис.2. В качестве материала катода использовался алюминий. В зависимости от мощности, генерируемого электронного пучка и времени работы пушки для охлаждения катода в одних модификациях использовался медный радиатор с естественным охлаждением, в других – принудительное жидкое охлаждение.



а) б)

Рисунок 2 - Общий вид ЭГП-6

Корпус анода и анодная вставка изготавливались из нержавеющей стали. В качестве высоковольтного изолятора использовалась керамика марки 22ХС. Междуэлектродное расстояние анод - катод в ЭГП-6 регулировалось перемещением анодной вставки 6 в корпусе анода 4 за счет резьбового соединения. Размеры анодного отверстия изменялись путем замены анодной вставки на вставку с другим диаметром анодного отверстия.

Основные параметры газоразрядной электронной пушки ЭГП-6 следующие:

- ускоряющее напряжение - $U \le 40 кВ$;
- длительность импульса напряжения - $\tau_u \le 5 мкс$;
- частота следования импульсов - $f_c \le 400 Гц$;
- диаметр электронного пучка - $d \ge 5 мм$;
- мощность электронного пучка в импульсе - $P_u \le 350 кВт$;
- время непрерывной работы - $t_p \le 0{,}5 час$;
- вес пушки - *0,7 кг.*

4. Высоковольтная газоразрядная электронная пушка ЭГП-14

Задача повышения рабочего напряжения решалась путем установки в конструкции газоразрядной электронной пушки ускоряющих электродов

позволяющих равномерно распределять ускоряющее напряжение в промежутке катод анод.

На основании теоретических исследований была выполнена разработка высоковольтной импульсной газоразрядной электронной пушки ЭГП-14 (рис.3, 4).

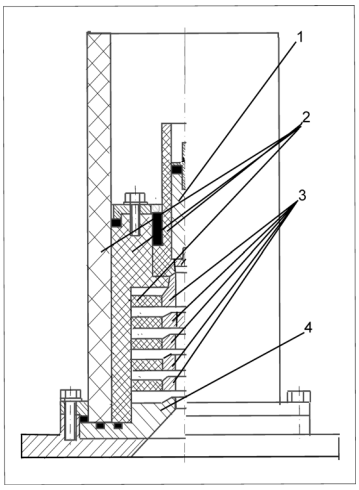


Рисунок3 - Схема высоковольтной газоразрядной электронной пушки ЭГП- 14

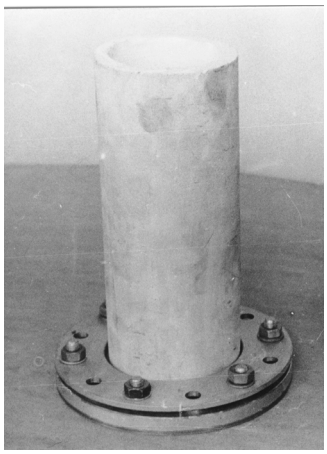


Рисунок 4 - Общий вид ЭГП 14

Пушка (рис.3) включает в себя следующие элементы: 1 –катод, 2 – изоляторы, 3 – ускоряющие электроды, 4 – анод.

Электрическая прочность промежутка анод-катод, находящегося в вакууме, создается за счет газовой изоляции путем работы ее в левой ветви кривой зажигания Пашена. В то же время необходимо обеспечить достаточную длину изоляционного промежутка по поверхности. Эта задача решается путем изготовления специальных проточек. Для обеспечения равномерности распределения электрического поля и увеличения электрической прочности в межэлектродном пространстве анод-катод установлены ускоряющие электроды, позволяющие увеличить длину изоляционных промежутков между ними.

Пушка рассчитана для работы в импульсном режиме. Охлаждение элементов пушки естественное, что снижает время ее работы. Электронная пушка формирует цилиндрический электронный пучок. Повышение мощности ЭГП может достигаться за счет использования принудительного охлаждения элементов пушки.

Основные параметры пушки:

- ускоряющее напряжение - $U \le 100 кВ$;
- длительность импульса - $\tau_u \le 5 \cdot 10^{-6} с$;
- частота следования - $f_c \le 200 Гц$
- диаметр электронного пучка - $d_A = 0{,}008 м$;
- габаритные размеры –диаметр основания - $d = 180 мм$, высота - $h = 200$ мм .

 ISSN 1991-7848

- мощность электронного пучка в импульсе - $P_u \le 10^6\ Bm$;
- средняя мощность - $P_{cp} \approx 10^3\ Bm$
- время непрерывной работы - $t_p \le 0{,}5час$.

5. Результаты исследований и их обсуждение

Проводились экспериментальные исследования характеристик ЭГП-6 с использованием оборудования и методики изложенной в [7].

Импульсные вольт-амперные характеристики газоразрядной электронной пушки ЭГП-6, приведенные на рис.5, экспериментально измерены в гелии при различных давлениях. (1- 133 Па; 2 – 106 Па; 3 – 53 Па. В качестве рабочего газа использовался гелий. Диаметр катода составлял $d_к$ *=8 мм;* диаметр анодного отверстия – d_A *=9 мм*; междуэлектродное расстояние L_{AK}*=1 мм.* Характеристики построены в двойном логарифмическом масштабе и представляют собой наклонные прямые линии. Эти результаты хорошо согласуются с результатами работы [8].

В Табл.1 приведены результаты аппроксимации вольт-амперных характеристик, показанных на рис.5, эмпирическими формулами вида

$$I_n = f(P)\cdot U_n^m,$$

где I_n, U_n – ток и напряжение газоразрядной электронной пушки; $f(P)$ – функция давления

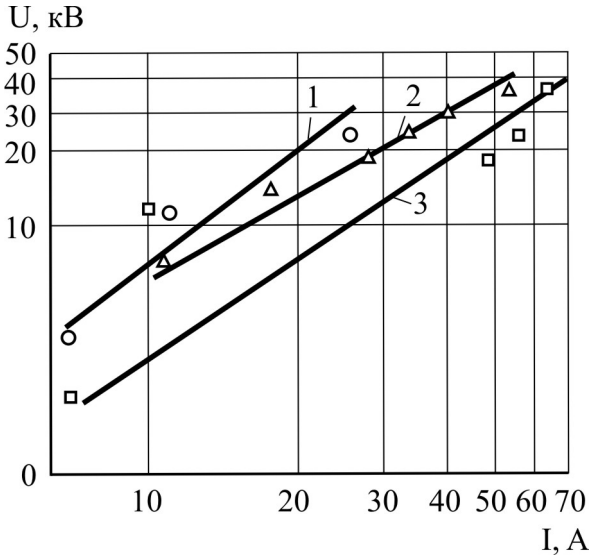


Рисунок 5 - Вольт-амперные характеристики газоразрядной электронной пушки ЭГП-6 в импульсном режиме работы

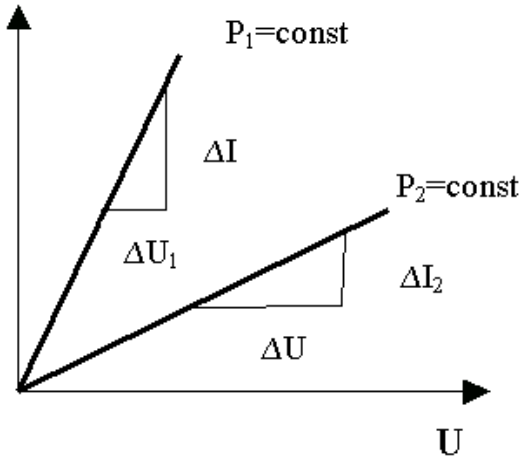


Рисунок 6 - Типовые вольт-амперные характеристики газоразрядной электронной пушки

Таблица 1

Номер характеристики	Рабочее давление гелия He, *Па*	$f(P)$	m
1	133	2,0658	1,0104
2	106	1,6587	0,955
3	53	0,3777	1,334

Величина функции $f(P)$, как видно из таблицы, растет с повышением давления. При этом происходит рост тока в ВТР и снижение ускоряющего напряжения. Поэтому оценку влияния рабочего давления на параметры ЭГП целесообразно осуществлять с использованием параметра, учитывающего изменение как тока, так и напряжения. В качестве этого параметра была использована крутизна вольт-амперных характеристик. На рис.6 приведены типовые вольт-амперные характеристики газоразрядной электронной пушки при различных давлениях ($P_1<P_2$) в двойном логарифмическом масштабе. Как видно из рис. 6 с увеличением давления газа крутизна вольт-амперных характеристик возрастает

$$S_2 = \frac{\Delta I_2}{\Delta U_2} > S_1 = \frac{\Delta I_1}{\Delta U_1} \qquad для \quad P_2 > P_1.$$

В связи с этим для повышения рабочего давления газоразрядной электронной пушки необходимо, чтобы при повышении давления $P_2>P_1$ крутизна характеристик не изменялась и $S_2=S_1$.

Анализ вольт-амперных характеристик (рис.5) позволил выделить следующую закономерность: увеличение рабочего давления P в ЭГП-6 приводит к росту тока электронного пучка I_u, снижению ускоряющего напряжения U_u при постоянной мощности источника питания. Это явление связано с интенсификацией процессов ионизации в ВТР с ростом давления.

Крутизна S семейства вольт-амперных характеристик (рис.5), приведенная на рис. 7, показывает ее рост с увеличением давления.

При создании газоразрядных электронных пушек практический интерес представляет повышение их рабочего давления. Это позволяет реализовывать на их основе новые технологические процессы и упрощать используемое оборудование. Влияние междуэлектродного расстояния L_{AK} на параметры электронного пучка представлено на рис. 8.

Из характеристик возможно заключить, что снижение L_{AK} приводит к уменьшению крутизны S, а следовательно к повышению рабочего давления.

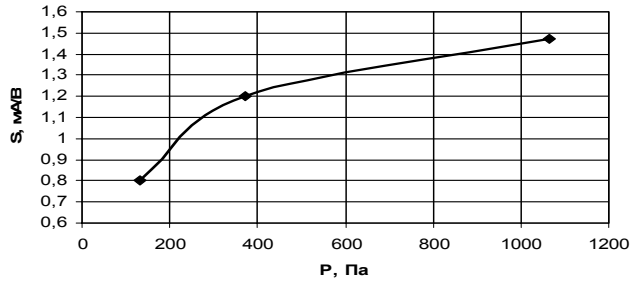


Рисунок 7 - Зависимость крутизны S импульсных вольт-амперных характеристик ЭГП-6 от давления P гелия

Проводились исследования вольт-амперных характеристик ЭГП-6 в непрерывном режиме. На рис.9 приведены экспериментальные зависимости

 ISSN 1991-7848

$I_n = f(U_n)$, измеренные при различных *P=const* гелия и $L_{AK} = 1мм$, d_A*=8 мм.* построеные в двойном логарифмическом масштабе, а на рис.10 – изменение крутизны *S*.

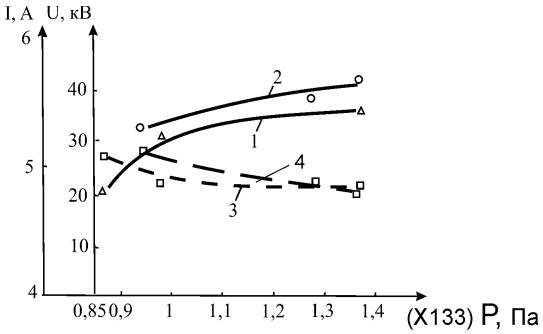


Рисунок 8 - Семейство экспериментальных характеристик ЭГП-6 в импульсном режиме работы зависимости ускоряющего напряжения U_u и тока I_u от давления P и междуэлектродного расстояния L_{AK}, где кривая 1 описывает $I_u = f(P, L_{AK})$ для $L_{AK} = 2мм$; 2- $I_u = f(P, L_{AK})$ для $L_{AK} = 4мм$; 3- $U_u = f(P, L_{AK})$ для $L_{AK} = 2мм$; 4- $U_u = f(P, L_{AK})$ для $L_{AK} = 4мм$.

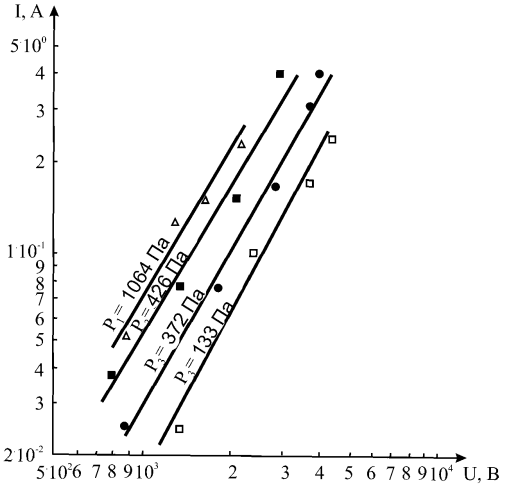


Рисунок 9 - Экспериментальные вольт – амперные характеристики ЭГП-6 в непрерывном режиме

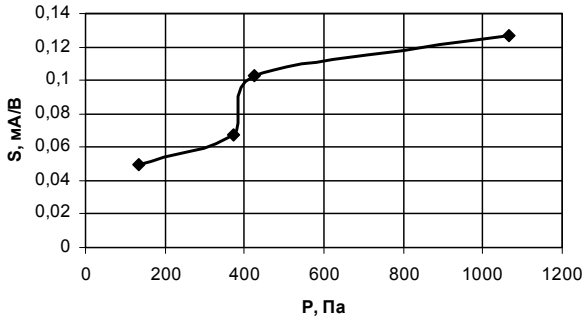


Рисунок 10 - Изменение крутизны S вольт-амперных характеристик ЭГП-6 в непрерывном режиме

Как показано на рис.6 повышение давления приводит к росту крутизны *S* вольт-амперных характеристик ЭГП-6 или уменьшению динамического сопротивления ЭГП $R_d = \Delta U / \Delta I$. Статическое сопротивление ЭГП-6 $R_{CT} = U / I$ с ростом давления также уменьшается. Однако величина крутизны *S* в непрерывном режиме на один два порядка ниже, чем в импульсном режиме. Это связано с большими токами электронного пучка, получаемыми при работе ЭГП в импульсном режиме.

Экспериментальная вольт-амперная характеристика высоковольтной ЭГП-14 (рис.11) измерены при поддуве гелия; $\tau_и \le 5 \cdot 10^{-6} c;\ f_c \le 200 Гц$; $P_{ср} \approx 10^3 Вт$; $P_и \le 10^6 Вт$.

При работе ЭГП-14 наблюдается рост крутизны вольт-амперной характеристики с ростом давления. Повышение ускоряющего напряжения снижает расхождение поперечного сечения электронного пучка и увеличивает длину его пробега, обеспечивая тем самым увеличение длины диагностируемой области газового потока.

Благодаря работе в низком вакууме созданные ЭГП-6 и ЭГП-14 позволяют значительно упростить диагностическое оборудование при проведении аэродинамических экспериментов, так обеспечивают вывод электронного пучка в рабочую среду без использования различных методов создания перепада давлений, например дифференциальной откачки.

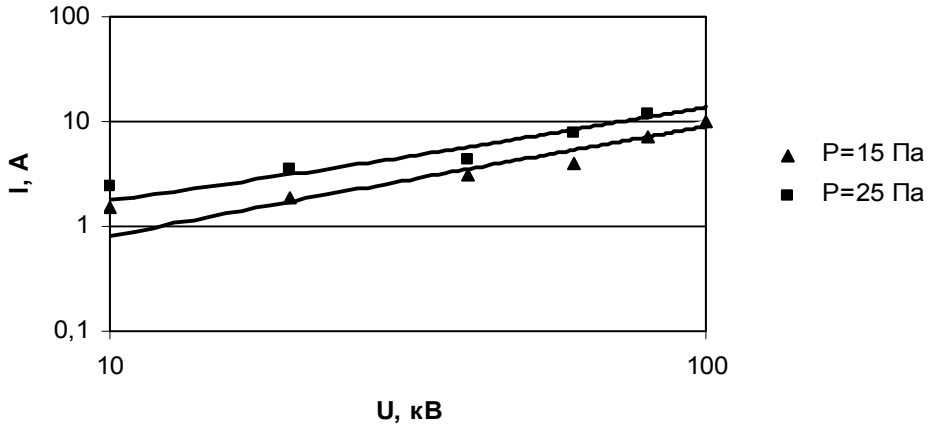


Рисунок 11 - Экспериментальные вольт-амперные характеристики высоковольтной газоразрядной электронной пушки ЭГП-14 в импульсном режиме

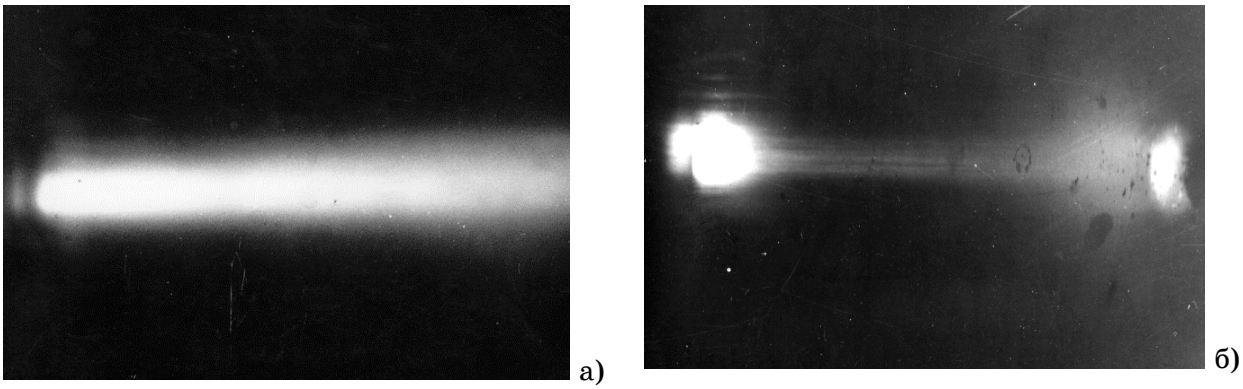


Рисунок 12 - Фотографии траектории электронного пучка

На рис.12 приведены фотографии траекторий электронного пучка в воздухе при давлении 133 Па. На рис.12а распределение плотности газа равномерное, а на рис. 12б - неравномерное. Изменение интенсивности свечения позволяет оценивать изменение плотности газовых потоков.

Свечение газа связано с неупругими взаимодействиями электронов пучка с молекулами и атомами остаточного газа, результатом которого является их возбуждение или ионизация, что приводит к излучению квантов электромагнитного излучения, используемого при диагностике.

6. Выводы

На основании исследований вольт-амперных характеристик при различных конструктивных параметрах газоразрядных электронных пушек с полым анодом и холодным катодом обнаружены закономерности влияющие на повышение рабочего давления. Это позволило создать газоразрядные электронные пушки ЭГП-6 и ЭГП-14 для визуализации сложных газовых течений в диапазоне давлений ниже $P < 1200\ Па$, при ускоряющих напряжениях $U_u < 100\ кВ$. Максимальная мощность инжектируемого электронного пучка в импульсе составляла $N_u \le 10^6\ Вт$.

Созданные ЭГП представляют также практический интерес для реализации различных низковакуумных электронно-лучевых технологических процессов.

ЛИТЕРАТУРА

1. 1.Горелов В.А., Данилович А.И..О газодинамическом методе генерации мощных импульсных электронных пучков и возможности использования их в газодинамическом эксперименте. Ученые записки ЦАГИ, т.7, №3, 1976, с.55 – 64.
2. 2.Данилевич А.И., Горелов В.А. Исследование генерации электронных пучков в высоковольтном импульсном разряде. Письма в ЖТФ, т.5, вып. 2, 1979, с.83-86.
3. Павлов С.И. Применение электронных пучков для измерений .- М.: Энергия , 1972 .- 102 с.
4. 4. Циглер С.А., Берд Л.Л., Олсон К.Х., Халл Д.А., Мориэл Д.А. Исследование распределения плотности в разреженных газах методом зондирования электронных пучков, Приборы для научных исследований, 1964, №4, с.23-31.
5. Hurlbut F.C. Elektron beam density probe for measurements in rarefied gas flows, Journ. Apple. Phys., 1959, v/30, №3, p.273-277.
6. 6.Нестерихин Ю.Е., Солоухин Р.И. Методы скоростных измерений в газодинамике и физике плазмы. М. Наука, 1971 , 239 с.
7. 7.Тутык В.А. Электронная газоразрядная пушка для низко вакуумных технологических процессов. // Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов в машиностроении (Том 2) (Сборник докладов 7-й Международной конференции «Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов»).- Харьков: ННЦ ХФТИ, ИПЦ «Контраст», 2006.- с.76-80.
8. В.А.Чернов В.А, Завадская В.И. Экспериментальное исследование газодинамических характеристик электронных пушек высоковольтного тлеющего разряда. Proceeding III international conferens on electron beam technologies, Varna, Bulgaria, 1991, p.166/

УДК 539.3

Н.Н.Волосова, В.И.Сарандачев, П.А. Стеблянко

СОПОСТАВЛЕНИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕРМОУПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ НА ПРИМЕРЕ НЕКОТОРЫХ ДЕТАЛЕЙ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Порівняння результатів з аналогічними результатами, отриманими за допомогою метода покомпонентного розщеплення підвищеної точності і кінцево-різницевого методу, показало добре спів падання результатів в околі середини валка, а по мірі наближення до краю, де стан є неодномірним за осьовою і радіальною координатах, результати можуть суттєво відрізнятися. В околі краю валка, де стан є неодномірним за осьовою і радіальною координатах, для розрахунків температурного напружено-здеформованого стану доцільно застосовувати метод покомпонентного розщеплення підвищеної точності, оскільки він дає більш точні результати у вузлах просторової сітки, ніж кінцево-різницевий метод.

Введение. Долговечность валков станов горячей прокатки зависит от величины и характера их нагружения. Однако, наряду с указанными факторами, значительное влияние на долговечность оказывают температурные условия работы валков.

Степень нагрева валков в процессе прокатки зависит от величины обжатия, механических свойств прокатываемого металла, трения в очаге деформации, скорости и времени процесса прокатки, подачи охлаждающей эмульсии, коэффициентов теплопроводности, конвенции, излучения и т.д. Нагрев валков определяет их профиль и, следовательно, влияет на условия деформации металла, как по длине, так и по ширине полосы.

В связи с развитием непрерывных станов и тенденцией роста скоростей прокатки тепловой баланс и температурный режим работы валков приобретает большое значение.

Особенностью работы валков станов горячей прокатки является периодичность их нагрева от прокатываемого металла и охлаждение водой. В процессе нагрева и охлаждения в поверхностном слое валков возникает переменное температурное поле, под действием которого появляются значительные циклические температурные напряжения. Величина этих напряжений, в зависимости от режимов работы прокатного стана, может в значительной степени превышать предел текучести материала и являться основной причиной возникновения сетки разгара и последующей термической усталости [1].

При горячей прокатке наибольшее напряжение на поверхность валка в зоне контакта с прокатываемым металлом. Однако в этой зоне материал находится в условиях всестороннего сжатия, а в таких случаях допускаемые напряжения практически в 4 раза могут превышать предел

© ВОЛОСОВА Н.Н., САРАНДАЧЕВ В.И., СТЕБЛЯНКО П.А., 2006

 ISSN 1991-7848

текучести. Таким образом, разработка более точных методов расчета термонапряженного состояния таких деталей металлургических конструкций является актуальной задачей.

В работах [3-4] решен ряд нестационарных задач механики деформируемого твердого тела, где применялись физические соотношения теории термоупругопластичности, позволяющие описывать простые и близкие к простым процессы деформирования и процессы деформирования по траекториям малой кривизны [7]. Связанные нестационарные задачи решены в работах [5, 6, 9].

Одним из наиболее эффективных приемов при численном решении пространственных нестационарных задач теории термоупругопластичности является подход, основанный на использовании для определения неизвестных величин, метода дробных шагов или метода покомпонентного расщепления [3, 4, 8] в сочетании с представлением искомых величин в виде сплайн-функций [3-6, 8, 9]. Преимущество данного подхода обусловлено тремя факторами. Он не сложнее в реализации, чем конечно-разностный метод [3-4]. Решение находится в виде сплайна во всей области определения, в то время как разностное решение ищется только на сетке. Дает более высокий порядок аппроксимации, что позволяет выбирать более крупную сетку по координатам по сравнению с конечно-разностным методом при условии достижения одинаковой точности вычислений [2, 4].

Постановка нестационарных задач теории термоупругопласти-чности. Основной задачей нестационарной теории термоупруго-пластичности является определение перемещений (скоростей перемещений) и компонент тензоров напряжений и деформаций, возникающих в пространственном теле в процессе его нагружении, когда некоторые элементы тела работают за пределом упругости материала. Процесс нагружения будем рассматривать развивающимся во времени, что может вызвать движение отдельных частей тела.

Пусть первоначально изотропное и однородное тело V, ограниченное поверхностью S , в начальный момент времени t=0 находится в естественном ненапряженном состоянии, где α^i - оси произвольной ортогональной системы координат, i = 1, 2, 3. Затем тело подвергается нагружению внешними силами и нагреву. Это могут быть объемные силы $\vec{K}(\alpha^i,t)$, воздействующие на каждый элемент тела, и поверхностные силы $\vec{\Sigma}_n(\alpha^i,t)$, действующие на части поверхности тела S_Σ. На другой части поверхности тела S_v, которая может быть определенным образом закреплена, задаются скорости перемещений $\vec{V}(\alpha^i,t)$. Конфигурация тела задается уравнением поверхности $\Phi(\alpha^i)=0$, которая ограничивает его. Механические характеристики материала при исследовании процессов деформирования по прямолинейным траекториям и траектория малой кривизны задаются в виде мгновенных диаграмм растяжения образцов.

Исходя из перечисленных данных, необходимо определить температурное поле, составляющие вектора скорости перемещений, компоненты тензора напряжений и компоненты тензора деформаций. Для этого необходимо воспользоваться уравнениями движения, геометрическими, физическими уравнениями и уравнением тепло-проводности.

При решении нестационарной задачи теории пластичности в тех частях тела, где возникают необратимые деформации, будем пользо-ваться определяющими уравнениями, описывающими процессы нагружения как по прямолинейным траекториям, так и по траекториям деформирования малой кривизы. Здесь используется форма физических уравнений, приведенная в монографии [3].

Полная система уравнений в общем случае имеет вид [3-4]

$$\frac{\partial \vec{W}}{\partial t} = A_1 \frac{\partial \vec{W}}{\partial \alpha} + A_2 \frac{\partial \vec{W}}{\partial \beta} + A_3 \frac{\partial \vec{W}}{\partial \gamma} + \vec{B}, \qquad (1)$$

где $\vec{W}$ - вектор, компонентами которого будут скорости пере-мещений v_i, составляющие тензоров напряжений и деформаций $\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij},\ i,j=1,2,3$. Система (1) решается при определенных начальных и граничных условиях.

Нестационарное трехмерное уравнение теплопроводности, используемое при решении связанных задач механики деформи-руемого твердого тела, имеет вид

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{a}{H_1 H_2 H_3}\left[\frac{\partial}{\partial \alpha}\left(\frac{H_2 H_3}{H_1}\frac{\partial T}{\partial \alpha}\right) + \frac{\partial}{\partial \beta}\left(\frac{H_1 H_3}{H_2}\frac{\partial T}{\partial \beta}\right) + \frac{\partial}{\partial \gamma}\left(\frac{H_1 H_2}{H_3}\frac{\partial T}{\partial \gamma}\right) + \frac{W_*}{\lambda}\right], \qquad (2)$$

где

$$W_* = S_{ij}\dot{Y}_{ij} - \frac{S_{ij}\dot{S}_{ij}}{2G} + \frac{\sigma_{ij}}{3}(\dot{\varepsilon}_{ij} - 3\alpha\dot{T}) - \frac{\sigma_{ii}\dot{\sigma}_{ii}}{9K}, \qquad (3)$$

$$S_{ij} = \sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma,\ \ \dot{Y}_{ij} = \varepsilon_{ij} - \delta_{ij}\varepsilon,\ \ \sigma = \frac{\sigma_{11}+\sigma_{22}+\sigma_{33}}{3},\ \ \varepsilon = \frac{\varepsilon_{11}+\varepsilon_{22}+\varepsilon_{33}}{3},$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)},\ \ K = \frac{E}{1-2\nu},$$

H_1, H_2, H_3 - коэффициенты Ляме, a – коэффициент температуропроводности, λ - коэффициент теплопроводности, E-модуль Юнга, ν - коэффициент Пуассона. Точкой сверху обозначены скорости (производные по времени) от соответствующих величин.

При решении нестационарных пространственных задач в цилиндрической системе координат $r,\ \varphi,\ x$ в уравнении (2) следует положить $H_1 = H_3 = 1,\ H_2 = r,$, $\alpha = r,\ \beta = \varphi,\ \gamma = x$. Тогда из уравнения (2) получим

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a\left[\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\cdot\frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2}\cdot\frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}\right] + \frac{aW_*}{\lambda r}. \qquad (4)$$

 ISSN 1991-7848

Аналитический метод решения. Аналитическое определение температуры и напряжений в прикладной задаче для валка блюминга 1150 (сталь 50ХН, минимальный катающий диаметр *d = 900 мм*, длина *l=2700 мм.)* оказалось возможным лишь в упрощенной одномерной постановке[1]. Приведем основные результаты.

Температурное поле рассматриваемого цилиндрического тела, нагреваемого через единицу поверхности граничной плоскости, имеет вид

$$T = \frac{2q\sqrt{t}}{\sqrt{\pi\lambda c\rho}}\left\{ e^{-\frac{x^2}{4a\tau}} - \sqrt{\pi}\,\frac{x}{2\sqrt{at}}\left[1 - \hat{O}\left(\frac{\tilde{o}}{2\sqrt{\grave{a}t}}\right)\right]\right\}, \qquad (5)$$

где T – температура, ℃; t – время контакта; $a = \frac{\lambda}{c\rho}$ – коэффициент теплопроводности, характеризующий быстроту выравнивания температур различных точек температурного поля валка; x – осевая координата; c – теплоемкость материала валка; ρ – плотность материала валка, q – тепловой поток; $q = \alpha(t_2 - t_1)$, α – коэффициент теплоотдачи через окалину; $\alpha = \frac{\lambda}{s}$; λ – теплопроводность окалины; s – толщина; $\Phi\left(\frac{x}{2\sqrt{at}}\right)$ – интегралы вероятности распределения ошибок.

Для определения температурных напряжений рабочего валка получены формулы, справедливые при симметричном распределении температур относительно оси валка

$$\sigma_z = \frac{E\alpha}{1-\mu}\left(\frac{2}{R^2 - r_0^2}\int_{r_0}^{R} Trdr - T\right); \qquad (6)$$

$$\sigma_t = \frac{E\alpha}{1-\mu}\left(\frac{1}{r^2}\int_{0}^{r} Trdr + \frac{r^2 + r_0^2}{r^2(R^2 - r_0^2)}\int_{0}^{R} Trdr - T\right); \qquad (7)$$

$$\sigma_r = \frac{E\alpha}{1-\mu}\left(-\frac{1}{r^2}\int_{r_0}^{R} Trdr + \frac{r^2 + r_0^2}{r^2(R^2 - r_0^2)}\int_{r_0}^{R} Trdr - T\right); \qquad (8)$$

где $\sigma_z, \sigma_t, \sigma_r$ – соответственно осевое, окружное и радиальное нормальные напряжения; α – коэффициент линейного расширения материала валка; E, μ – модуль упругости и коэффициент Пуассона соответственно; R, r, – соответственно, радиус поверхности валка, текущий радиус.

Расчеты по формулам показывают, что максимальные температурные напряжения в поверхностном слое валка, с учетом промежуточного слоя окалины, наблюдаются при наиболее длительном времени контакта с разогретым металлом. При этом температура поверхности валка в месте контакта достигает 450°С. При установившемся режиме прокатки температура поверхности валка не превышает 300°С.

Конечно-разностный метод. Для сравнения результатов рассмотрим конечно-разностный подход к решению нестационарной двухмерной задачи теории термоупругопластичности и нестационарного уравнения теплопроводности. Введем в рассмотрение сетку по времени ω_r и сетку по координатам ω_h

$$\omega_r = \left\{ t_p; t_{p+1} = t_p + \tau \ ; \ t_0 = 0; \ p = 0,1,2,... \right\}, \tag{9}$$

$$\omega_h = \left\{ \begin{matrix} r_i, \varphi_j, x_k; r_{i+1} = r_i + h_1 \ ; \varphi_{j+1} = \varphi_j + h_\varphi; x_{k+1} = x_k + h_3; \\ i = 0,1,...N_1; j = 0,1,...N_2; k = 0,1,...N_3. \end{matrix} \right\}. \tag{10}$$

Неявная разностная схема в произвольном узле r_i, φ_j, x_k выглядит так

$$\begin{aligned} \frac{T^{p+1/3} - T^p}{\tau} = \frac{a}{h_1^2}\left[\alpha\left(\mu_1\left(T^{p+1}\right) + \frac{h_1}{r_i}\lambda_1\left(T^{p+1}\right)\right) + \beta\left(\mu_1\left(T^{p}\right) + \frac{h_1}{r_i}\lambda_1\left(T^{p}\right)\right)\right] + \\ + \frac{a}{r_i^2}\frac{1}{h_\varphi^2}\left[\alpha\mu_2\left(T^{p+1}\right) + \beta\mu_2\left(T^{p}\right)\right] + \frac{a}{h_3^2}\left[\alpha\mu_3\left(T^{p+1}\right) + \beta\mu_3\left(T^{p}\right)\right] + \frac{W_*^p\left(r_i, \varphi_j, x_k\right)}{\rho\ c\ r_i}. \end{aligned} \tag{11}$$

Здесь $\alpha + \beta = 1$, $\lambda_n, \mu_n \ (n = 1,2,3)$ - разностные операторы, аппроксимирующие производные соответственно первого и второго порядка по координатам [3, 4].

Для явной схемы ($\alpha = 0, \beta = 1$) на основании (11) можно записать

$$T^{p+1} = T^p + \tau\, a\left\{ \frac{1}{h_1^2}\left(\mu_1\left(T^{p}\right) + \frac{h_1}{r_i}\lambda_1\left(T^{p}\right)\right) + \frac{\mu_2\left(T^{p}\right)}{r_i^2 h_\varphi^2} + \frac{\mu_3\left(T^{p}\right)}{h_3^2}\right\} + \tau\frac{W_*^p\left(r_i, \varphi_j, x_k\right)}{\rho\ c\ r_i}. \tag{12}$$

Перейдем к решению системы (1). Обозначим через $W_m^{\ p}$ компоненты вектора $\vec{W}$, которые вычисляются в момент времени $t=t_p$. Аналогичные обозначения вводятся и для составляющих вектора $\vec{B}$. При переходе от уравнений полной системы к разностной схеме их решения производные по времени и по координатам заменяются разностными отношениями.

Неявная схема конечно-разностного метода для определения неизвестных величин, позволяют получить такие формулы

$$\frac{W_m^{\ p+1} - W_m^{\ p}}{\tau} = \alpha\left(\Lambda_1 W_m + \Lambda_2 W_m + \Lambda_3 W_m\right)^{p+1} + \beta\left(\Lambda_1 W_m + \Lambda_2 W_m + \Lambda_3 W_m\right)^{p} + B_m^{\ p}. \tag{13}$$

Здесь $\alpha + \beta = 1$, а также введены обозначения для дифференциального оператора первого порядка $\Lambda_s W_m \equiv A_s \dfrac{\partial W_m}{\partial \alpha_s}, s = 1,2,3$. Суммирование по s не ведется[4].

В случае применения явной схемы ($\alpha = 0, \beta = 1$) из (13) получим

$$W_m^{\ p+1} = W_m^{\ p} + \tau\left(\Lambda_1 W_m + \Lambda_2 W_m + \Lambda_3 W_m\right)^{p} + \tau\, B_m^{\ p}. \tag{14}$$

 ISSN 1991-7848

Для случая осесимметричного состояния тела при использовании схемы Кранка-Николсона ($\alpha = \beta = 0{,}5$), формулы (13), (14) перепишутся так

$$W_m^{p+1} = W_m^p + \tau\left(\Lambda_1 W_m + \Lambda_3 W_m\right)^p + \tau\, B_m^p, \qquad (15)$$

$$\left(W_m\right)_{n+1}^{p+1} = W_m^p + \frac{\tau}{2}\left\{\left(\Lambda_1 W_m + \Lambda_3 W_m\right)_n^{p+1} + \left(\Lambda_1 W_m + \Lambda_3 W_m\right)^p + 2B_m^p\right\}. \qquad (16)$$

Метод расщепления повышенной точности. Применим к векторному уравнению (1) в случае осесимметричного нагружения метод покомпонентного расщепления [4]. Введем в рассмотрение сетку по времени ω_r с учетом дробного шага.

$$\omega_r = \left\{t_p;\, t_{p+1/2} = t_p + \tau_1;\, t_{p+1} = t_{p+1/2} + \tau_2;\, \tau = \tau_1 + \tau_2;\, t_0 = 0;\, p = 0,1,2,..\right\}$$

Идея метода покомпонентного расщепления состоит в том, что вместо векторного уравнения $\frac{\partial \vec{W}}{\partial t} = A_1 \frac{\partial \vec{W}}{\partial r} + A_3 \frac{\partial \vec{W}}{\partial z} + \vec{A}$ на полном шаге интегрирования по времени τ ($t \in [t_p;\ t_{p+1}]$) последовательно решаются два эквивалентных ему одномерных векторных уравнения, каждое на своем дробном шаге по времени. Эти уравнения имеют вид

$$\frac{\partial \vec{W}}{\partial t} = A_1 \frac{\partial \vec{W}}{\partial r} + \phi_1 \vec{B}, \quad t \in [t_p, t_{p+1/2}], \quad \frac{\partial \vec{W}}{\partial t} = A_3 \frac{\partial \vec{W}}{\partial z} + \phi_2 \vec{B}, \quad t \in [t_{p+1/2}, t_{p+1}], \qquad (17)$$

где $\phi_1 + \phi_2 = 1$, t_p – момент времени, в который решение задачи уже известно, t_{p+1} - момент времени, в который решение разыскивается.

Разностная схема для расщепленной системы (17) может быть представлена так

$$\frac{1}{\tau}(\vec{W}^{p+1/2} - \vec{W}^p) = \alpha\Lambda_1 \vec{W}^{p+1/2} + \beta\Lambda_1 \vec{W}^p + \phi_1 \vec{B}^p,$$

$$\frac{1}{\tau}(\vec{W}^{p+1} - \vec{W}^{p+1/2}) = \alpha\Lambda_3 \vec{W}^{p+1} + \beta\Lambda_3 \vec{W}^{p+1/2} + \phi_2 \vec{B}^{p+1/2}, \qquad (18)$$

где $\alpha+\beta = 1$, а дифференциальные операторы $\Lambda_n \vec{W}$ вводятся следующим образом $\Lambda_1 \vec{W} = \frac{A_1}{h_1} \cdot \lambda_1(\vec{W}), \quad \Lambda_3 \vec{W} = \frac{A_3}{h_3} \cdot \lambda_3(\vec{W}), \quad n = 1, 2.$

Здесь $\lambda_n(...)$ – разностные операторы, $\vec{W}^{p+n/2}$, $\vec{B}^{p+n/2}$ – векторы решения и правой части для соответствующего момента времени, h_n – шаги интегрирования по координатам *r, z* ..

В случае, когда $\alpha = 0$, $\beta = 1$, схема (18) будет явной. Тогда расчетные формулы можно представить так

При $\alpha = 1, \beta = 0$ выражение (18) дает неявную схему. Если же $\alpha = \beta = 1/2$, то имеет место схема Кранка–Николсона, которая в отличии от двух предыдущих схем первого порядка имеет второй порядок аппроксимации

по времени. Решение системы (18) предлагается строить при помощи следующей итерационной процедуры

$$(\vec{W}^{p+1/2})_{i+1} = \vec{W}^{p} + \tau \frac{A_1}{h_1}\{\ \alpha\lambda_1(\vec{W}^{p+1/2})_i + \beta\lambda_1(\vec{W}^{p})\ \} + \tau\phi_1\vec{B}^{p}, \qquad (19)$$

$$(\vec{W}^{p+1})_{j+1} = \vec{W}^{p+1/2} + \tau \frac{A_3}{h_3}\{\ \alpha\lambda_3(\vec{W}^{p+1})_j + \beta\lambda_3(\vec{W}^{p+1/2})\ \} + \tau\phi_2\vec{B}^{p+1/2}. \qquad (20)$$

В качестве нулевой итерации (*i=0, j=0*) выступает решение, построенное по явной схеме метода покомпонентного расщепления . Все неизвестные величины представим в виде сплайн-функций. Применение аппарата сплайн-функций дает возможность записать новые более точные разностные выражения для дифференциальных операторов $\lambda_n(...)$, входящих в состав схемы расщепления. Это позволяет повысить, как минимум на порядок, точность вычислений по координатам [2-4].

Численные результаты. Рассмотрим задачу об определении температурного поля и связанного с ним нестационарного теормо-упруго-пластического напряженно-деформируемого состояния цилиндрического тела. Для определения компонентов тензоров напряжения $\sigma_r, \sigma_\varphi, \sigma_x, \sigma_{r\varphi}$, деформации $\varepsilon_r, \varepsilon_\varphi, \varepsilon_{r\varphi}$ и компонентов вектора скорости перемещений v_r, v_x на полном шаге по времени использовались расчетные формулы метода покомпонентного расщепления повышенной точности. Все искомые величины задавались в форме напряженного сплайна по координатам. При этом температура T в каждый момент времени определялась из решения уравнения теплопроводности с учетом величин $\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}\ (i, j = r, \varphi, x)$, определенных на предыдущем шаге по времени.

На рисунках 1 и 2 показано распределение температуры по радиусу в торце валка блюминга для фиксированных моментов времени. Сплошные линии получены при помощи метода покомпонентного расщепления повышенной точности, пунктирные – аналитическим, методом и точечные линии – с помощью конечно-разностного метода.

Здесь задавалось $\tau_* = a\tau / h^2 = 0{,}05$, а безразмерное время определялось как $t = n\tau_*\ (n = 0;1;...)$. Полученные результаты позволили сравнить вычислительную эффективность примененных методов расчета и сделать такие выводы.

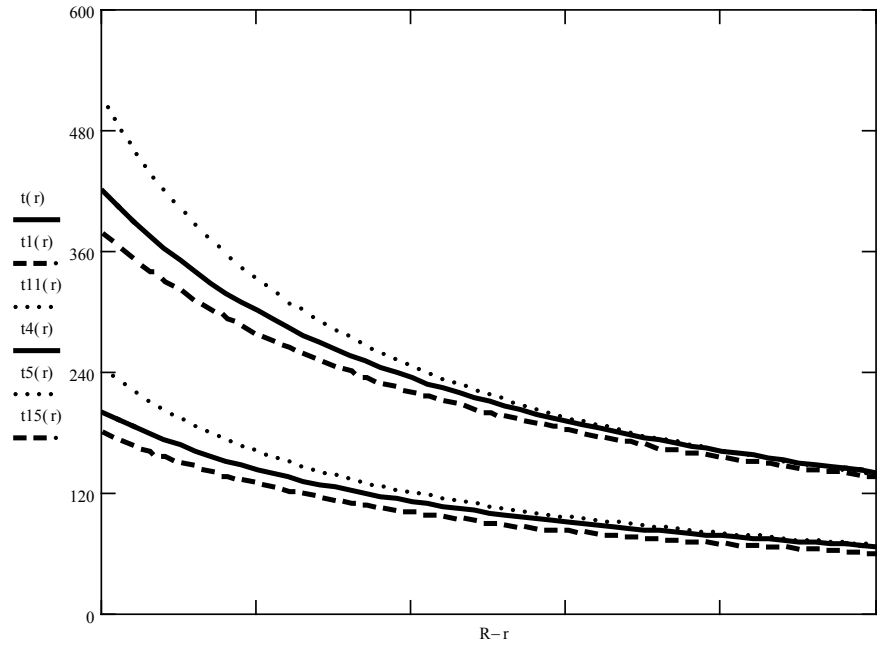


Рисунок 1

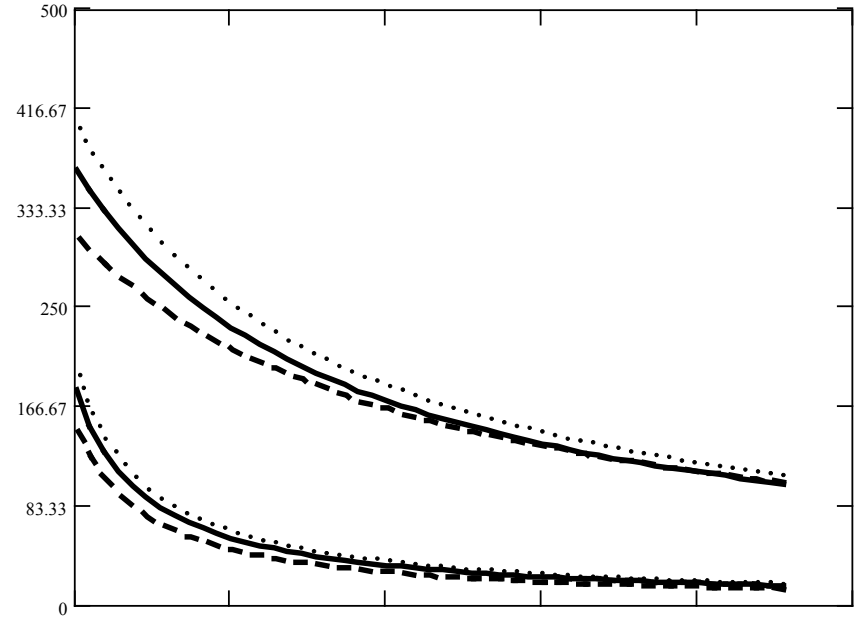


Рисунок 2

Выводы

Расчеты показывают, что интенсивность температурных напряжений в поверхностном слое валков значительно превышает предел текучести материала и, следовательно, является решающим в появлении сетки поверхностных трещин. Валки выдерживают большие напряжения потому, что они являются сжимающими и направлены вдоль оси валка, а также действуют в тонком поверхностном слое. Температура поверхности валка при наиболее длительном времени контакта *(t=0,165 с)* достигает 450°С.

Сравнение результатов с аналогичными результатами, полученными при помощи метода покомпонентного расщепления повышенной точности и конечноразностного метода, показало хорошее совпадение результатов (расхождение по температуре до 3,5%) в окрестности средины валка, а по мере приближения к краю, где состояние является заведомо неодномерным по осевой и радиальной координатам, результаты могут существенно отличались. В окрестности края валка, для расчетов температурного напряженно-деформированного состояния целесообразно применять метод покомпонентного расщепления повышенной точности, поскольку он дает более точные результаты в узлах пространственной сетки, чем конечно-разностный метод.

Получены рекуррентные формулы неявной схемы метода расщепления для определения температуры, скоростей перемещений, напряжений и деформаций, позволяют получить соответственно третий и четвертый порядок аппроксимации метода по координатам.

ЛИТЕРАТУРА

1. Боли Б., Уэйнер Д. Теория температурных напряжений М.:Мир, 1964. - 517 с.
2. Крылова Т.В., Лигун А.А. Асимптотические оценки погрешности приближения функций интерполяционными напряженными сплайнами // Теория приближения.- Днепропетровск, 1994.-С.63-64.
3. Стеблянко П.А. Пространственные нестационарные задачи теории термоупругопластичности. – К.: ИМ НАН Украины, 1997. – 273 с.
4. Стеблянко П.А. Методы расщепления в пространственных задачах теории пластичности. – Киев: Наукова думка, 1998. – 304 с.
5. Стеблянко П.О., Волосова Н.М. Зв’язана задача для попередньо стиснутого циліндра при крутячому моменті, що циклічно змінюється // Системные технологии.–Вып.2(19).–Днепропетровск. Сист.техн., 2001.–С. 94 – 102.
6. Стеблянко П.О., Волосова Н.М. Урахування ефекту тепловиділення у двумірній нестаціонапрній задачі теорії термопластичності для товстостінного циліндру // Вестник Кременчужского государственного политехн. университета. Вып. 3/2002 (14).-Кременчуг: 2002.-С.133-135.
7. Шевченко Ю.Н., Савченко В.Г. Механика связанных полей в элементах конструкций. Т.2.Термовязкопластичность.–Киев:Наукова думка,1987.–264с.
8. Steblyanko P.A. The method of decomposition in the non-stationary space problems of the theory of plasticity. – K.: SMC HE, 2000. – 159 p.
9. Steblyanko P. A., Volosova N. N. Non-stationary 2D and 3D coupled problems of the theory of thermoplasticity //System technologies. – 2(13).– Dnepropetrovsk, 2001. – P. 174 – 181.

 ISSN 1991-7848

УДК 621. 547

В.Ю. Костыря, Ю.Н. Ушаков

ПРОБЛЕМАТИКА СВС–МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТРУБ С ПОВЫШЕННЫМ СОПРОТИВЛЕНИЕМ АБРАЗИВНОМУ ИЗНОСУ

У статті подано результати аналізу оцінки можливості використання СВС– матеріалів, отриманих за допомогою литва, для виготовлення труб спеціального призначення, для використання в якості пульпометів або пожежних моніторів. За допомогою моделі неявних знань подано ймовірність заміни з крапки зору інформаційної єдності

В данной статье проведен комплексный анализ возможности применения литых СВС–материалов для изготовления труб специального назначения, использующихся в качестве пульпомётов и пожарных мониторов. При помощи модели неявных знаний показана преемственность такой замены с позиций единого информационного пространства.

This text about a new SHS–material for the special rolling guns.

Введение

Немаловажную роль в техническом развитии играют так называемые высокотехнологичные объекты при изготовлении которых используются материалы с особыми свойствами. Так, отсутствие в нашей стране месторождений ряда легирующих и упрочняющих сталь элементов (вольфрама, хрома, молибдена) создает острую необходимость в разработке современного и узкоспециализированного металлопродукта, сбалансированного по критерию "стоимость-эффективность".

Анализ проблемы и постановка целей статьи. Одной из важнейших проблем, отечественных машин и механизмов является выбор материала способного при незначительной себестоимости успешно противостоять сосредоточенному абразивному нагружению и пульсационным нагрузкам.

В настоящее время отечественное материаловедение материалов для труб специального назначения (пульпомётов, мониторов, стволов артиллерийских и метеорологических орудий) развивается по трем основным направлениям: сплавы (стали и чугуны); стали специального назначения; композиционные материалы.

Специфика рассматриваемых технических объектов заключается в том, что они, в процессе эксплуатации подвергаются многократных

© В.Ю. КОСТЫРЯ, Ю.Н. УШАКОВ, 2008

чередующимися теплосмена, 1100°С–20°С, и значительного абразивного воздействия.

Первые две группы создавались последовательно в течение двух прошлых веков, и имеют схожие свойства и области использования. Следует отметить, что оптимально сконструированный технический объект, и материал эффективен в среднем 10–15 лет за это время он устаревает морально, а при правильной эксплуатации и физически, после чего необходимо разрабатывать новое, а не утилизировать или совершенствовать то, что зачастую давно устарело.

Потребность в системе повышения качества и надёжности привела к развитию "умных" материалов ("Smart" mar), которая являлась предметом интенсивных исследований в Западных странах. Для реализации системы «получение нового материала–профессионализм–неявные знания– реализация новых материалов» необходимо: чёткое сопоставление критериев технологичности и надёжности и их логическая обработка, распознавание угрозы и управление соответствующими механизмами структурной оценки. Как один из вариантов материалов для изготовления труб специального назначения можно рассматривать литые металлокомпозиционные материалы, полученные по методу СВС. Применение самораспространяющегося высокотемпературного синтеза даёт возможность получить материал на основе таких «классических» конструкционных материалов как алюминий, титан или сталь, а высокие температуры СВС позволяют в качестве противабразивного упрочнителя различные рекомбинации высокоизносостойких керамических соединений от шпинелей и корундов до монокристаллов.



Рисунок 2 – Микроструктура литого СВС–композита с железной, упрочнение монокристаллами оксида алюминия

 ISSN 1991-7848

Кроме того СВС материалам не требуется термообработка.

Каждый СВС – композит, по своей природе, не может считаться гомогенной системой, из-за присутствия как минимум трех фаз,.

Поэтому, в отличии от стали и сплавов, подобные материалы целесообразно рассматривать как интегральную систему двух дискретных факторов: физико-механического взаимодействия матрицы и упрочняющей фазы; физико-химического или химического взаимодействия тех же фаз.

Для СВС-композитов – материалов со структурой колониально-игольчатого типа – характерны существенная хаотичность на всех уровнях структурной гетерогенности, структурная самоорганизация и слабая зависимость от диффузионных процессов. Кроме того, возможность получения в матрице различных структурных рекомбинаций (различной морфологии и состава упрочняющей фазы, послойного фазораспределения и направленной дефектонасыщенности) позволяет, без существенных затрат, ”индивидуализировать” СВС-металлокомпозиты под конкретное изделие. Кроме того, градиент размеров первичных зерен матрицы композита будет эффективно препятствовать зарождению и распространению трещин. Кроме того, частицы фазы-упрочнителя, распределяясь в матрице, позволяют повысить запас конструктивной прочности изделий и их износостойкости.

Экспериментальные данные показывают следующий факт: упрочнение СВС – металлокомпозитов при отжиге происходит более интенсивно, чем при закалке, термоулучшении и изотермической закалке – классических упрочняющих видах термической обработки металлов и сплавов. Это можно объяснить сочетанием (в различных степенях вариации) двух факторов термического воздействия:

– релаксацией гаммы термических напряжений и их нивелировкой по объему СВС-металлокомпозита в процессе стабилизирующей термической обработки, сопровождающейся замедленным охлаждением материала, и накоплением термонапряжений во время ускоренного охлаждения при обработке по ”упрочняющим” режимам

– термической, термодинамической и структурной стабилизацией элементов фазы-связки на микро- и мезоструктурных уровнях, осуществляющейся в процессе отжига за счет протекания локальных диффузионных процессов, и дискретизацией СВС-металлокомпозита на локальные микрообъемы.

Если рассматривать изнашивание СВС композитов как комплексный процесс, включающий механо-химическое легирование, деструкцию и абразивно-деформационное упрочнение, то становится ясно,

что основной вклад в износостойкость СВС-металлокомпозитов будут вносить наличие (отсутствие) фазы-связки и величина площади трибоконтакта у частиц-упрочнителей.

Это можно объяснить тем, что в первом случае преобладает износ собственно матрицы металлокомпозита, а во втором – ее деструктуризация. При этом основной вклад в повышение износостойкости, запаса конструктивной прочности вносит бульшая протяженность границ межфазных поверхностей раздела, способствующая формированию бульшего количества фазы-связки.

Таблица 1

Комплекс свойств предлагаемых СВС-металлокомпозитов

МАТРИЦА	Упрочняющая фаза/система (форма)	Показатель ресурсооценки
Fe	α-Al_2O_3 (монокристаллы)	HVμ = 4800 МПа; σв = 1050 МПа; износ = 0,02 г/см^2; KCU = 22 Дж/см^2
Fe	Al_2O_3–ZrO_2 (зерно)	HVμ = 4200 МПа; σв = 650 МПа; износ = 0,029 г/см^2; KCU = 13 Дж/см^2
Fe	Al_2O_3–MgO–Cr_2O_3–ZrO_2 (зерно)	HVμ = 4470 МПа; σв = 720 МПа; износ = 0,018 г/см^2; KCU = 10 Дж/см^2

Данный факт можно объяснить с точки зрения структурной стабильности как функцию износостойкости СВС-металлокомпозитов. На макроуровне структура в исследуемых материалах различается только морфологией частиц упрочняющей фазы. Однако при этом меняется количество фазы-связки из-за меньшей величины протяженности межфазных поверхностей раздела – в СВС-металлокомпозитах, упрочненных зернами, ее меньше, чем у композитов с монокристаллами. Это является главным фактором, определяющим запас конструктивной прочности СВС-металлокомпозитов. Следует отметить, что, несмотря на невысокие значения ударной вязкости, требуемый запас конструктивной прочности СВС-металлокомпозитам, упрочненным оксидной фазой, обеспечивает структурная стабильность, невосприимчивость к разупрочняющему действию эксплуатационных температур и когерентная взаимосвязь структурных ингредиентов в единый конгломерат посредством фазы-связки.

Выводы

На основании вышеизложенного можно отметить, как один из вариантов материалов для изготовления трубных изделий, работающих на износ, можно рассматривать металлокомпозиционные мате-

 ISSN 1991-7848

риалы, полученные по методу СВС. Высокая твердость, износостойкость и структурная стабильность с достаточно высоким значением ударной вязкости позволяют предположить возможность использования разработанных СВС-материалов в качестве деталей машин и механизмов, работающих в условиях интенсивных истирающих и абразивных нагрузок, в возможном контакте с агрессивной средой, при локальном разогреве поверхности. В разработанных материалах возможные структурные изменения будут сведены к минимуму. Во-первых, из-за отсутствия в составе композита термодинамически активного углерода и закрепления атомов железа оксидной фазой-упрочнителем. Во-вторых, из-за наличия у СВС-металлокомпозита остаточного энергетического потенциала, соответствующего высокотемпературной области СВС – реакции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Developments in electric and explosive reactive armor. Jane's International Defense Review, 1997, May, p. 50-51
2. J. Brown, P.C. Endersby Electric Armour Research in the UK. All Electric Combat Vehicle (AECV). Second International Conference, 8-th – 12-th June 1997, p. 333-343
3. Патент 1547528 (Великобритания). Бронеплита / Опубл. 20.06.79, N 4708, МКИ F3x Изобретения в СССР и за рубежом. Вып. 97 (МКИ F41), 1979, N 12, с. 7.
4. Защита танка - анахронизм или жизненная необходимость? (журнал "Военный парад", 5(53), 2002, стр. 82-84) В. А. Григорян.
5. Материалы глобальной сети - http://www.btvt.narod.ru/4/armor.htm, http://www.btvt.narod.ru/4/kontakt5, htm,http://www.btvt.narod.ru/4/era_defeat.htm

УДК 621.774

Е.Д.Кузнецов, Б.Ю.Никсдорф

СТРУКТУРА ОТКЛОНЕНИЙ ТОЛЩИНЫ СТЕНКИ ГОРЯЧЕКАТАНЫХ ТРУБ, ИЗГОТАВЛИВАЕМЫХ НА СТАНАХ ПИЛИГРИМОВОЙ ПРОКАТКИ.

Приведені відомості про алгоритм і результати дослідження відхилень товщини стінки безшовних труб, прокатаних на станах гарячої пилигримової прокатки. За основу узято вимірювання товщини стінки по довжині труби за допомогою ультразвукового товщиноміра і подальшого виділення компонент з використанням цифрових фільтрів.

Приведены сведения об алгоритме и результатах исследования отклонений толщины стенки бесшовных труб, прокатанных на станах горячей пилигримовой прокатки. За основу взято измерения толщины стенки по длине трубы с помощью ультразвукового толщиномера и последующего выделения компонент с использованием цифровых фильтров.

Algorithm data and results of research of deviations of wall thickness of seamless pipes are given. For a basis are taken measurements of a thickness of walls on length of pipes by means of ultrasonic thickness gauge and the subsequent allocation of components with use of digital filters.

Введение

Горячая пилигримовоя прокатка в мировой практике производства стальных труб с каждым годом становится всё более экзотичной технологией, применяемой преимущественно для изготовления толстостенных труб. Тем не менее до настоящего времени в Украине этот способ является основным технологическим элементом, применяемым при производстве труб нефтяного сортамента.

Такая технология наряду с относительно малой производительностью и довольно низким качеством поверхности по сравнению с другими современными способами характеризуется повышенным браком по толщине стенки, даже при довольно широких допусках +12,5/-10%.

Проблема. В настоящее время Нижнеднепровский трубный завод использует трубную заготовку из низколегированных сталей собственного производства и экономические потери в значительной мере компенсируются дополнительной переплавкой забракованных труб. Вне сомнения, вследствие повышения цен на энергоносители, а также перехода на изготовление труб из высоколегированных сталей они станут довольно ощутимыми. И в связи с этим неизбежно возрастет актуальность проблемы устранения такого вида брака.

© Е.Д.КУЗНЕЦОВ, Б.Ю.НИКСДОРФ, 2008

 ISSN 1991-7848

Среди экспертов отсутствует однозначное мнение об оптимальном пути решения этой проблемы. Называют следующие причины брака и пути его устранению:

- нестабильность подачи и поворота гильзы, требуется заменить механизм подачи поворота;
- неравномерность температуры слитка при прошивке и гильзы при прокатке, нужна стабилизация температурного режима;
- погрешность установки валков пилигримового стана, необходимы меры по их устранению;
- отсутствие средств измерения толщины стенки в процессе прокатки, рекомендуется установить лазерный толщиномер;
- физический и моральный износ оборудования, нужна коренная реконструкция трубопрокатных цехов;
- эксцентриситет гильзы, образующийся при пропшивке слитка;
- на существующих пилигримовых станах вообще не возможна прокатка труб повышенной точности и так далее.

Вопросам повышения точности толщины стенки труб, прокатываемых на пилигримовым станах, посвящено большое количество публикаций, но в основном они касаются станов ХПТ и ХПТР. Подробный обзор их сделан в [1].

В связи с перечисленными обстоятельствами возникает необходимость выбора приорететных направлений решения повышения точности горячекатаных труб, которые при минимуме материальных и временных затрат позволят устранить влияние наиболее значимых причин брака.

Результаты исследований. Для решения такой задачи проведено исследование размерной структуры отклонений толщины стенки труб, прокатанных на пилигримовых установках Нижнеднепровского трубопрокатного завода. В его основу положена методика, описанная в [2 – 6]. Суть её состоит в том, что для выбора оптимального пути решения проблемы повышения точности вначале проводится комплекс исследований, предусматривающих предварительный анализ характера отклонений размеров. Затем определяются основные причины образования размерных погрешностей и пути их устранения. Такой подход успешно использовался ранее при разработке и освоений технологий изготовления труб ответственного назначения из высоколегированных сталей и сплавов.

Исследование проведено на трубах следующих размеров: 168×9 мм; 168×10,6 мм; 219×20 мм и 299×9,5 мм, прокатанных на обоих пилигримовых установках завода. Измерение толщины стенки

производилось с помощью УЗ толщиномеров по всей поверхности трубы по спирали с шагом 50 мм. Количество измеренных значений толщины стенки для отдельных труб находилось в пределах 3000 – 7000.

Алгоритм обработки измерительной информации, предусматривал выполнение следующих операций: удаление ошибок измерений; вычисление статистических характеристик измерительной информации; определение трендовых составляющих и их удаление; оценку вероятности попадания значений толщины стенки в различные интервалы полей допусков; оценку амплитудно-частотных характеристик отклонений толщины стенки; проектирование цифровых фильтров; выделение составляющих отклонений толщины стенки; вычисление статистических характеристик выделенных составляющих; формирование баланса размерных погрешностей и их ранжирование по степени влияния.

Полученные результаты свидетельствуют об ошибочности существующего мнения о причинах повышенного брака и способов устранения их влияния. Принципиальным результатом являются данные, свидетельствующие о том, что низкая точность в значительной мере связана с недостатками технологического обеспечения производства, принятого на заводе.

В частности установлено, что трубы различных размеров, прокатанные в разных цехах, имеют относительно стабильный, однотипный характер отклонений толщины стенки. Эта закономерность показана на рис. 1.

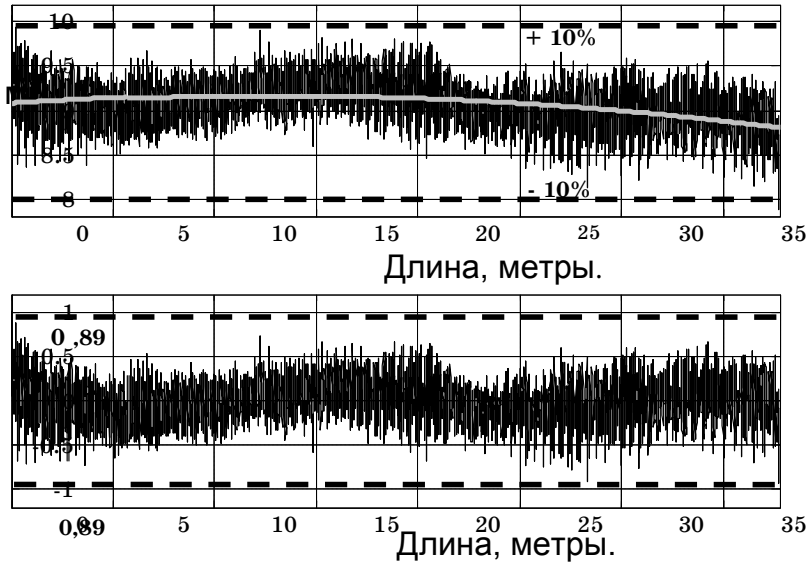


Рисунок 1 - Отклонения толщины стенки по длине трубы размером 168×9 мм, прокатанной в ТПЦ-4.

 ISSN 1991-7848

На верхнем графике приведены измеренные значения толщины стенки и светлой линией показана расчетная трендовая составляющая. Установлено, что её образование связано с неравномерностью диаметра дорна. Анализ технологических инструкций и фактического состояния используемых при прокатке труб дорнов свидетельствуют о том, что эти факторы вносят значительную долю погрешности. Без повышения точности дорнов не может быть обеспечено повышение точности труб, поскольку они ответственны за образование смещения средних значений толщины стенки относительно номинальных даже при идеальной работе механизма подачи и поворота гильзы. По этой и другим причинам этот вид погрешности зачастую достигает существенных величин.

На нижнем графике показано положение отклонений толщины относительно среднего значения в пределах поля допуска после удаления трендовой составляющей. Сделав допущение, что в этом случае отклонения толщины стенки подчиняется нормальному закону распределения, выполнен расчет вероятности попадания её значений в различные поля допусков. Результаты приведены в таблице № 1.

На основании полученных результатов с достаточной величиной достоверности можно сделать вывод о возможности изготовления труб в пределах поля допуска ± 6% при относительно малых затратах на изменение технологии.

Расчетные значения нормированных автокорреляционных функций, типовой пример которых показан на рис. 2, свидетельствуют о том, что образование других составляющих отклонений толщины стенки связано с наличием случайных и периодических компонент.

Таблица 1

Вероятности попадания значений отклонений толщины стенки трубы размером 299×9,5 мм, ТПЦ-4.

Интервалы поля допуска, %	Вероятность попадания в допуск.
± 10	0,99999* / 1**
± 9	0,99996* / 1**
± 8	0,99972* / 0,99980**
± 7	0,99854* / 0,99900**
± 6	0,99363* / 0,99530**
± 5	0,97710* / 0,98140**

* При совмещении средней толщины стенки с номинальным значением;
** после устранения параболического тренда.

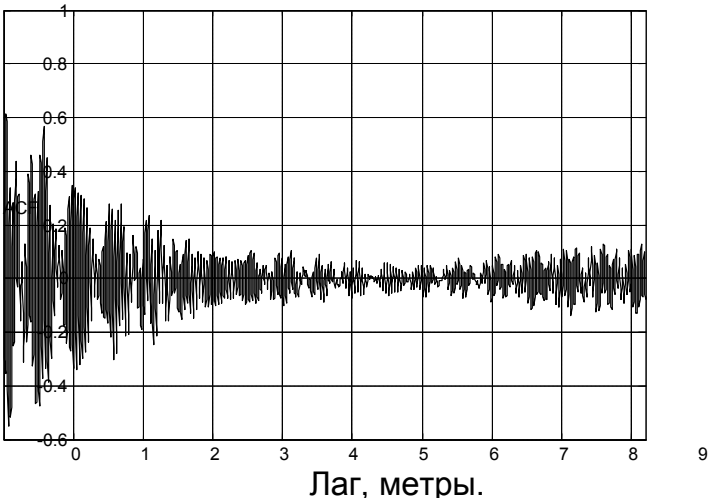


Рисунок 2 - Нормированная автокорреляционная функция отклонений толщины стенки трубы размером 168×9 мм.

Для определения периодических составляющих проведена оценка амплитудно-частотных характеристик отклонений толщины стенки относительно средних значений. Далее на их основе рассчитаны параметры цифровых фильтров и последующее разделение на составляющие, образование которых связано с воздействием различных технологических причин.

Типовая спектральная плотность отклонений толщины стенки показана на рис. 3. Здесь по оси абсцисс отложены значения приведенных частот, представляющих количество колебаний на метр длины, а по оси ординат амплитуды отклонений, выраженные в dB. На основании такого анализа установлено, что приведенная частота наибольших по амплитуде периодических отклонений находится в пределах (0,1 – 0,6)/ м.



Рисунок 3 - Амплитудно–частотные характеристики отклонений толщины стенки трубы размером 168×7,0 мм.

 ISSN 1991-7848

Такая закономерность дает основание считать, что образование такого рода составляющих связано с эксцентриситетом гильзы и наложением на него искажения поперечного профиля трубы, возникающего в процессе прокатки. Механизм этого явления иллюстрируется данными, приведенными на рис. 4.

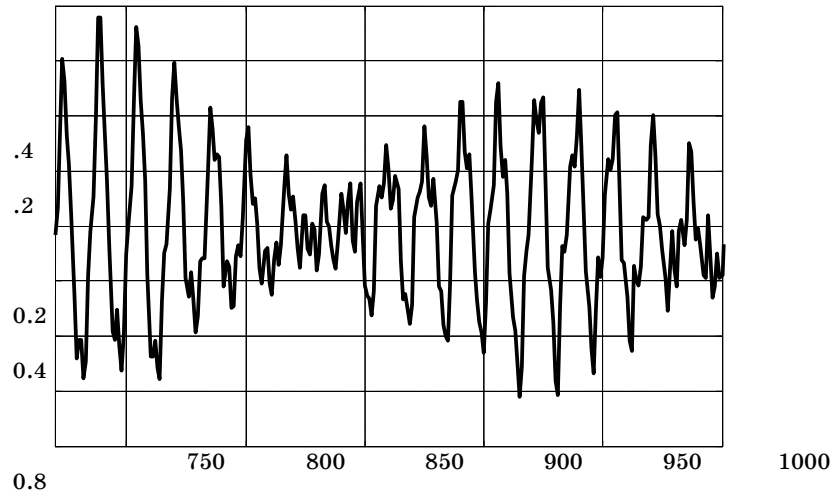


Рисунок 4 - Отклонения толщины стенки трубы размером 219 ×7,0 мм на участке длиной 300 мм (700 – 1000 мм).

Он может быть объяснен следующим образом. Вследствие неправильно выбранной калибровки, или из-за погрешностей изготовления и установки валков, применения повышенной подачи и по другим причинам в процессе прокатки в поперечных сечениях прокатываемых труб будут неизбежно возникать локальные утолщения или утонения. Вследствие поворота гильзы они будут накладываются на эксцентриситет гильзы, смещаясь относительно друг друга по фазе. При совпадении по фазе максимума, связанного с эксцентриситетом, и локального утолщения, разностенность возрастет. При совпадении с минимальным значением она уменьшится. На графике 4 это соответствует положениям около 740 мм и 840 мм. С учетом описанного механизма такой вид отклонений был назван «наведенной компонентой».

Спроектированные цифровые фильтры использовали для разделения отклонений толщины стенки на составляющие, приведенные на рис. 5. Низкочастотная составляющая характеризует стабильность исходной настройки стана на заданный размер. Она относительно мала и свидетельствует о том, что настройка стана довольно стабильна и прокатка может осуществляться без вмешательства оператора. Это обстоятельство дает основание утверждать, что предложение об оснащение стана лазерным толщиномером представляется излишним.

Наибольшую погрешность вносит «наведенная компонента». Её характер свидетельствует о том, что проблема замены подающего механизма гипербализирована. Более значима необходимость стабилизации величины подачи. На пилигримовых станах Нижнеднепровского трубопрокатного завода она задается вальцовщиками произвольно в довольно широком интервале, что приводит к повышенным отклонениям «наведенной компоненты». Действующие технологические инструкции не предусматривают четкую фиксацию этого технологического параметра. В противоположность этому при производстве холоднокатаных труб стабильность подачи является общеизвестным правилом, строго регламентированной величиной.

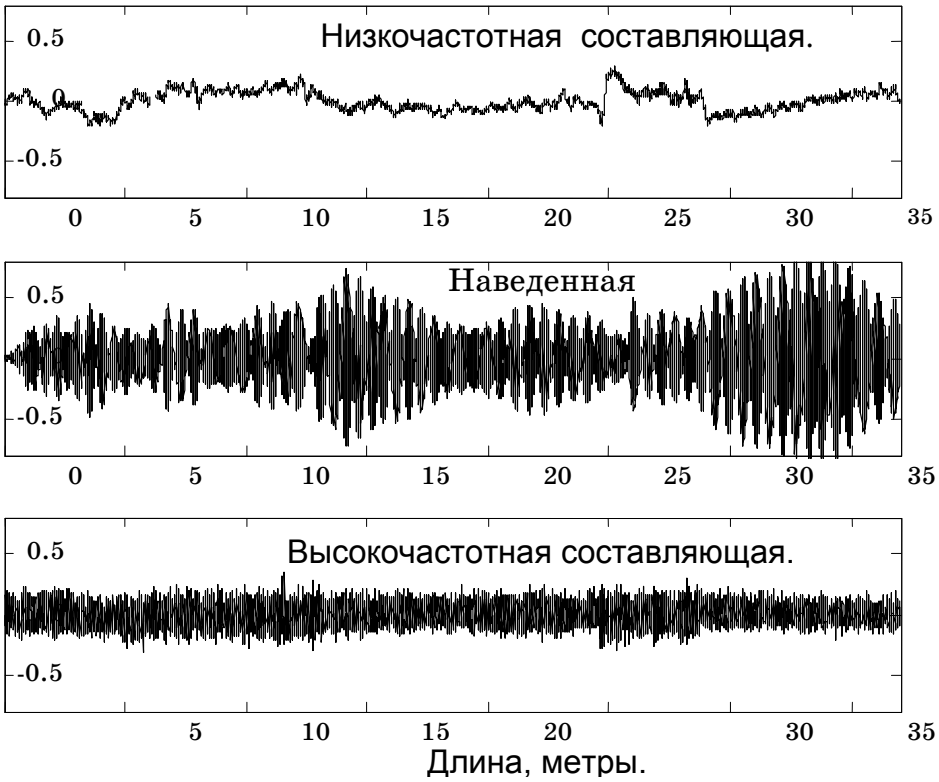


Рисунок 5 - Составляющие отклонений толщины стенки по длине трубы размером 168×8,9 мм.

Выводы

Проведенные исследования показали, что имеются большие резервы повышения точности размеров горячекатаных труб, прокатываемых на станах пилигримовой прокатки, без их коренной реконструкции. Для этого требуется внесение соответствующих корректив технологического и метрологического характера.

 ISSN 1991-7848

ЛИТЕРАТУРА

1. Кузнецов Е.Д. Развитие теории и практики производства прецизизионных стальных труб/ Сб. «Развитие теории процессов производства труб». Днепропетровск, 2005, С. 232 – 259.
2. Кузнецов Е.Д. Некоторые тенденции состояния производства стальных труб/ Металлургическая и горнорудная промышленность, № 1-2004, С. 14 – 18.
3. Кузнецов Е.Д., Кузнецов Д.Е., Проблема обеспечения точности размеров и качества поверхности при производстве труб/ Металлургическая и горнорудная промышленность, № 8 – 9, 2000, С. 336 – 339.
4. Д.Е.Кузнецов, В.С.Вахрушева, Е.Д.Кузнецов. Алгоритм оценки состояния поверхностей прецизионных труб/ Материалы 3-й Международной научно-практической конференции по проблемам совершенствования производства и эксплуатации трубной продукции// Днепропетровск, 2002, С. 98 – 103.
5. А.с. 1498573 (СССР). Устройство для контроля толщины стенки труб. Кузнецов Е.Д., Никсдорф Б.Ю., 1989, Б.И. № 29.
6. А.с. 1751908 (СССР). Способ управления трубопрокатным станом. Кузнецов Е.Д., Никсдорф Б.Ю., 1992, Б.И. № 28.

УДК

МарченкоК.Л., Фадеев М.М., Романцев Б.А., Гончарук А.В.,
АнанянВ.В.

ВИНТОВАЯ ПРОШИВКА НЕПРЕРЫВНОЛИТЫХ ЗАГОТОВОК

Приведены результаты исследований по винтовой прошивке непрерывнолитой заготовки с интенсификацией проработки структуры.

Приведені результаті досліджень по валковій прошивці безперервної заготовки з інтенсифікацією проробки структури.

Results of investigation in the roll piercing of the continuous cast billet with intensification of the structure work out had been presented.

Введение

Одним из наиболее перспективных направлений снижения себестоимости бесшовных труб является использование недорогой высококачественной исходной заготовки. Опыт эксплуатации МНЛЗ ОАО «Волжский трубный завод» (ВТЗ) показал высокую эффективность использования непрерывнолитой заготовки в достаточно широком марочном и размерном сортаментах для производства бесшовных труб. Однако при этом отмечаются характерные дефекты металлургического и прокатного происхождения.

В то же время имеется принципиальная возможность интенсификации проработки структуры путем прошивки заготовки с повышенными (20÷30%) обжатиями в пережиме валков. Однако при использовании традиционных подходов это может привести к снижению пластичности металла в области близкой к критическим обжатиям (6-8%) для сталей 10, 20, D; повышенному скольжению (в основном из-за высоких значений вытяжки – 2,5÷4,0); неблагоприятным условиям работы технологического инструмента прошивного стана.

На основании анализа геометрического очага деформации были разработаны рекомендации по калибровке рабочих валков прошивного стана.

Было рекомендовано использовать чашевидную схему прошивки при угле раскатки 8^0, обеспечивающую минимальное скольжение при прошивке на «посад». Также характерным для опытной калибровки являлось наличие участков «разгрузки» и редуцирования гильзы в выходном конусе. Прошивка производилась на прошивном стане ТПЦ-1 при угле подачи 12^0 и настройке очага деформации, обеспе-

© К.Л. МАРЧЕНКО, М.М. ФАДЕЕВ, Б.А. РОМАНЦЕВ, А.В. ГОНЧАРУК, В.В.АНАНЯН, 2008

 ISSN 1991-7848

чивающей получение гильзы ∅xd=120×80 мм на штатных линейках и оправках при температуре 1180 ^{0}C – 1200 ^{0}C.

В прокат задали 3 штанги ∅ 156 мм пл.223040 ст.Д. Штанги кроились на 4 части, ломку штанг производили на прессах. Нагрев трубной заготовки проводили по действующей ТИ. Все заготовки были зацентрованы пневматическим зацентровщиком в соответствии с ТИ.

Основные параметры прошивки и настройки прошивного стана представлена в таблице 1.

Таблица 1

Настройка прошивного стана

Параметры ПС	Номер гильзы						
	1	2	3	4	5	6	7
Диаметр оправки, мм	76	76	76	76	78	76	86
Расстояние между валками, мм	122	118	115	114	113	113	113
Расстояние между линейками, мм ζ=	134 1,1	130 1,1	126 1,09	121 1,06	119 1,05	119 1,05	119 1,05
Температура прошивки, ˚ С	1150	1190	1160	1180	1185	1180	1200
Диаметр гильзы, мм	132	127	123	121	120	120	120
Обжатие, u, %	21,8	24,3	26,3	27	27,6	27,6	27,6
Вытяжка, μ	2,2	2,5	2,79	2,95	3,17	3,04	3,86

Процесс прошивки протекал устойчиво. Для уменьшения диаметра последовательно увеличивали обжатие в пережиме от 21,8 до 27,6 %, а коэффициент овализации уменьшали с 1,1 до 1,05. Диаметр гильзы после прошивки в горячем состоянии получили 121-120 мм. При данной настройке прокатали 3-и гильзы. Две последние раскатали на раскатном стане на трубу 102×12,5мм на оправке раскатного стана ∅76 мм (ввод оправки на первой гильзе затруднялся, на второй гильзе увеличили диаметр оправки прошивного стана до ∅ 78 мм). Для оценки влияния увеличения коэффициента вытяжки с уменьшением толщины стенки гильзы на стабильность процесса поменяли оправку прошивного стана с ∅ 78 мм на ∅ 86 мм и прошили две гильзы, а последнюю гильзу затормозили в очаге деформации. С увеличением коэффициента вытяжки на 30% энергосиловые пара-

метры практически не изменились, процесс прошивки протекал стабильно. Замер заторможенной гильзы показал: диаметр гильзы в холодном состоянии 118 мм, длина контакта составила 295 мм, из них 170 мм во входном конусе и 95 мм в выходном конусе, ширина контактной поверхности в пережиме 55 мм, расчетное обжатие перед носком оправки составило 8 %. Замеры геометрические параметров показали, что они соответствуют требованиям ГОСТ, максимальный уровень разностенности составил от 1,8 до 2,4 мм. Однако, как на наружной так и на внутренней поверхности гильз наблюдаются продольные широкие вмятины (рис. 1) спирального вида, образование которых, по всей видимости, обусловлено применением штатных линеек и оправок для бочковидных валков.



Рис. 1. - Продольные широкие вдавы спирального вида, обусловленные применением штатных линеек и оправок для бочковидных валков

Осмотр 2-х труб размером 102×12,5 мм производился на столе осмотра. На наружной и внутренней поверхности по всей длине наблюдаются плены трубопрокатного происхождения.

С целью получения качественной поверхности гильзы (внутренней и наружной) предложено продолжить опытные работы по прошивке на чашевидных валках с использованием линеек и оправок новой калибровки.

 ISSN 1991-7848

Новый технологический инструмент позволяет осуществлять формоизменение металла в более «тесном» калибре, что уменьшает склонность металла к образованию дефектов на внутренней и наружной поверхностях гильз. Кроме того, прошивка ведется при повышенных углах подачи $\beta=14...15^0$. Это связано с тем, что при винтовой прокатке склонность металла к центральному разрушению в основном зависит от цикличности и величины частных обжатий на участке очага деформации от входа металла в валки до носка оправки. При использовании заготовки большего диаметра возрастает коэффициент вытяжки при прошивке, что приводит к уменьшению шага осевой подачи на участке от входа металла в валки до носка оправки, увеличению величины частных обжатий и повышению цикличности. Компенсировать это ухудшение деформационных условий можно только увеличением угла подачи рабочих валков.

Дальнейшие исследования процесса прошивки с повышенными обжатиями проводили на новом технологическом инструменте при повышенных углах подачи.

Экспериментальные исследования проводили для прокатки труб 2-х размеров 108×10 мм и 95×11мм из НЛЗ ст. 45 диаметром 156 мм. По действующей технологии для их производства используется круг диаметром 120 мм.

Для проведения эксперимента в кольцевую печь посадили 19 заготовок диаметром 156 мм и длиной 1,4-1,5 метра. Нагрев осуществляли до температуры 1240^0С. Настройку станов рассчитывали с учетом особенностей построения очага деформации. Во время прокатки фиксировали время прошивки, частоту вращения рабочих валков, токовые нагрузки и напряжение, углы подачи, которые изменяли от 8 до 14є. Прошивку осуществляли при 2-х вариантах настройки стана, в первом варианте получили гильзы размерами 126×18 мм для прокатки труб 108×10 мм, по второму варианту получили гильзы 119×16 мм для прокатки труб 95×11 мм. Всего прокатали 6 труб размерами 108×10 и 4 трубы размером 95×11. Дополнительно после прошивки выбросили из потока 7 гильз при разных углах подачи и настройке, а в стане для исследования затормозили две заготовки при обжатии в пережиме 28% на углах подачи 8° и 12° (рис. 2). Результаты эксперимента и настройка станов приведены в таблице 2. Трубы были предъявлены ОТК для оценки качества. Осмотр наруж-

ной и внутренней поверхности показал отсутствие дефектов, трубы по качеству соответствовали требованиям ГОСТ.

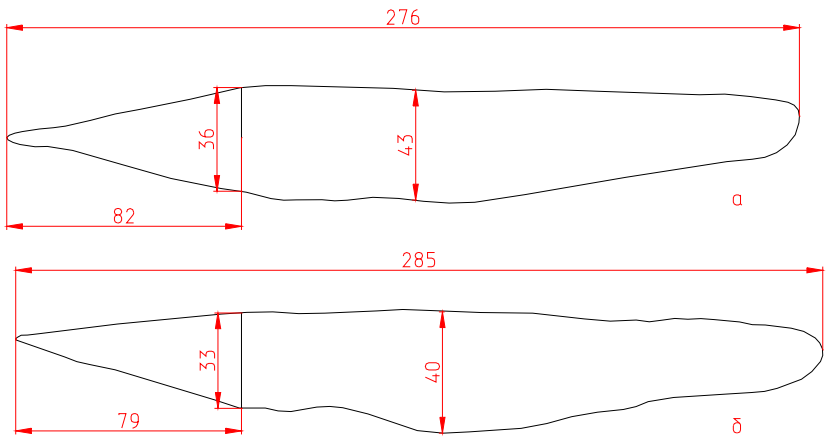


Рис. 2 – Форма контактной поверхности при обжатии в пережиме 28% (левая) (*а*) при угле подачи 12є; (*б*) при угле подачи 8^0

Для оценки макроструктуры отрезали образцы, которые протравили и осмотрели. Проведенные исследования показали отсутствие дефектов, при глубоком травлении остатки литой структуры на трубах не обнаружены. От гильзы также отобрали образцы, проконтролировали макроструктуру и провели глубокое травление металла. Металлографическое исследование гильз показало полную проработку поперечного сечения и отсутствие литой структуры в гильзах, прошитых по новой технологии.

В завершение были проведены исследования качества гильз, определены шаги винтовой линии при различных углах подачи, продольная и поперечная разностенность. На «недокатах» определили фактическую настройку стана, площадь контактной поверхности, изменение шага подачи в очаге деформации. Для определения величины скручивания на исходной заготовке нанесли продольную риску шириной 10 мм и глубиной 6 мм. Шаг винтовой линии при изменении угла подачи от 8^0 до 14^0 увеличился с 54 мм до 89 мм, соответственно время прошивки гильз длиной 5,6-5,7 м уменьшилось с 24,5 с до 16,5 с.

Укороченный очаг деформации позволил снизить энергосиловые параметры процесса, а достаточная длина раскатного участка достичь высокой точности гильз, а в дальнейшем и труб. Максимальная разностенность на гильзах составила 10,3%, на трубах 108×10 мм менее11%, на трубах 95×11 менее 10%.

Таким образом, установлена принципиальная возможность прошивки НЛЗ в гильзы на "посад" с уменьшением диаметра исходной

 ISSN 1991-7848

заготовки до 25% за один проход. Выбранные технологические режимы настройки прошивного стана позволили достичь глубокую проработку литой структуры при коэффициентах вытяжки от 3,0 до 4,0 без образования дефектов. Разработанная калибровка рабочего инструмента обеспечила высокую точность гильз и высокое качество по состоянию наружной и внутренней поверхности.

Таблица 2

Данные экспериментальных исследований процесса прошивки непрерывнолитой заготовки ф156 мм из стали 45

№ заготовки	Длина заготовки, м	Прошивной стан										
		Температура прошивки, ^{0}C	Угол подачи, град	Расстояние между валками, мм	Расстояние между линейками, мм	Частота вращения валков, мин$^{-1}$	Нагрузка, А	Время прошивки, с	Диаметр гильзы, мм	Внутренний диаметр, мм	Разностенность, мм	Средний шаг винтовой линии, мм
9	1,56	1170	8	117	125	42	1200	24,5	125			
10	1,62	1170	8	117	125	42	1200	24	123	85		53,74
18	1,53	1190	8	112	121	42	1400	23	119			
7	1,55	1170	10	117	125	42	1200	22	125			
8	1,56	1170	10	117	125	42	1400	23,5	122	84		56,71
16	1,56	1190	10	112	121	42	1400	23	119			
17	1,47	1190	10	112	121	42	1400	23	118	88	0,53	68,52
1	1,56	1170	12	117	125	40	1400	19,5	126			
2	1,57	1170	12	117	125	44	1400	17	126			
3	1,56	1170	12	117	125	44	1400	17,5	124	86	1,1	82,91
11	1,41	1180	12	114	122	42	1200	20,5	120			
12	1,59	1180	12	112	122	42	1400	27	118			
13	1,5	1190	12	112	122	42	1500	23	119	84	1,23	71,8
19	1,65	1190	12	112	121	42	1400	23	119			
4	1,56	1170	14	117	125	46	1400	15	126			
5	1,57	1170	14	117	125	42	1400	17,5	126			
6	1,57	1170	14	117	125	42	1400	17	124	87	1,86	89,19
14	1,53	1190	14	112	121	42	1600	20	119,5			
15	1,48	1190	14	112	121	42	1600	20,5	118	85	1,53	89,26

УДК 621.774

Матыко О.К., Фартушный Р.Н., Мульчин В.В., Романцев Б.А.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОШИВКИ НЕПРЕРЫВНОЛИТЫХ ЗАГОТОВОК ИЗ ЛЕГИРОВАННЫХ МАРОК СТАЛИ НА ТПА С ПИЛИГРИМОВЫМ СТАНОМ

Представлены результаты экспериментального исследования процесса прошивки непрерывнолитых заготовок в условиях ОАО «ТАГМЕТ». Разработан режим прошивки, позволяющий получать высококачественные трубы из легированных марок стали.

Наведені результати досліджень процесу прошивки безперервнолитих заготовок в умовах ВАТ «ТагМет». Розроблений режим прошивки, що дозволяє отримувати високоякісні труби з легованих марок сталей.

In this article the results of experimental investigation of the piercing process of the continuous cast billets in the conditions of Taganrog Metallurgical Works are represented. The mode of piercing allowing to produce high-quality pipes out of the alloyed steel grades has been developed.

Введение

На ТПА с пилигримовыми станами производство труб ведут по следующей технологической схеме. Заготовки нагреваются в нагревательных печах, далее производится прошивка заготовок в гильзу на прошивном стане винтовой прокатки и затем раскатка гильз в трубную заготовку на пилигримовом стане с последующим редуцированием в редукционном стане. Угол подачи при прошивке ограничен 4 градусами, что связано с конструкцией прошивного стана. Калибровка валков прошивного стана и его настройка оптимизированы для прошивки слитков из углеродистых сталей, степень деформации перед носком оправки составляет 11-12%, степень деформации в пережиме составляет 14,5%.

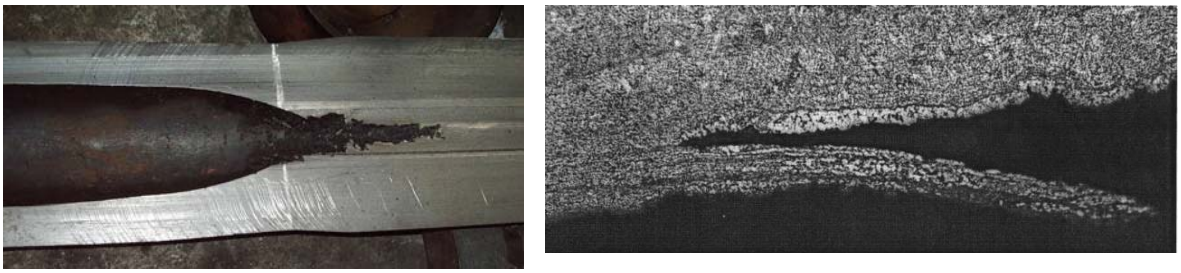
Проблема. Однако при прокатке легированных марок сталей при обжатии перед носком оправки 5% и более в центральной части заготовки наблюдается образование мелких трещин располагающихся по границам зерен; при обжатии 8-10% эти трещины переходят в видимые макротрещины, а при 12-15% они превращаются в полость с рваной поверхностью. Величина зоны разрушения металла находится в пределах 0,2-0,25 от диаметра прошиваемой заготовки (рисунок 1а).

Очевидно, что при таких настройках прошивного стана перед носком оправки образовывается полость. Дефекты поверхности этой

© МАТЫКО О.К., ФАРТУШНЫЙ Р.Н., МУЛЬЧИН В.В., РОМАНЦЕВ Б.А., 2008

 ISSN 1991-7848

полости частично завариваются и частично окисляются попавшим в полость кислородом и затем прикатываются оправкой прошивного стана к внутренней поверхности гильзы, превращаясь в грубые плены (рисунок 1б).



а) б)

Рисунок 1 – Образование внутренней полости при прошивке слитков (а) и дефект в виде внутренней плены (б)

Анализ температурных и деформационно-скоростных условий [1] показал, что процесс прошивки на ТПА протекает в условиях интенсивного скольжения металла относительно рабочей поверхности оправки и сопровождается значительным разогревом деформируемого металла. Например, при прошивке заготовок диаметром 340 мм из стали марки 20 в гильзу размерами DЧS = 315Ч70 мм был зафиксирован разогрев внутренних слоев металла на 60 – 80 ˚С (рисунок 2) температура внутренней поверхности гильзы составила примерно 1250 – 1260 ˚С. Это способствует частичной сварке давлением дефектов на внутренней поверхности гильзы, образовавшихся в полости перед носком оправки.

Производственные данные свидетельствуют о том, что при производстве труб из легированных марок стали образуется значительно большее количество плен на внутренней поверхности труб и очевидно это связано с тем, что заваривается меньшее количество дефектов на внутренней поверхности гильзы в процессе обжатия металла на оправке. Свариваемость этих дефектов зависит от углеродного эквивалента стали $C_{экв}$ [2], который в свою очередь зависит от химического состава стали (символами химических элементов показана их массовая доля в процентах):

$$C_{экв} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Si}{24} + \frac{Ni}{10} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{V}{14} + B .$$

С увеличением в стали содержания легирующих элементов и углерода, количество окисленных дефектов возрастает, впоследствии после раскатки на пилигримовом стане и при последующем редуцировании на внутренней поверхности труб вскрываются дефекты в ви-

де грубых плен. Статистический анализ качества труб из различных марок стали показал очевидную зависимость процента отбраковки труб по внутренним пленам от углеродного эквивалента (рисунок 3).

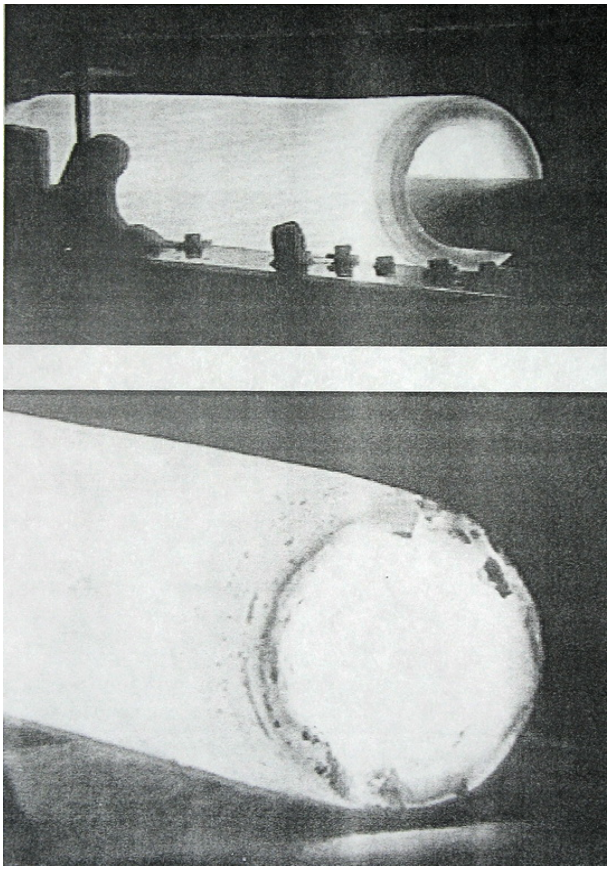


Рисунок 2 – Термограмма гильзы в процессе прошивки, температура внутренней поверхности ~ 1250 – 1260 ˚С, наружной ~ 1150 – 1200 ˚С

Результаты исследований. По опыту прокатки труб на ОАО «Тагмет», для снижения пленообразования в очаге деформации были созданы определенные условия для сварки дефектов с учетом повышения температуры металла в очаге деформации и проведена выплавка стали с минимально возможным углеродным коэффициентом. Это было также подтверждено при производстве труб из сталей марок 25ХГМА и 25ХГМФА.

Экспериментальной прокатке подвергали заготовки из стали марки 25ХГМФА трех плавок, химический состав которых соответствовал требованиям стандарта.

Для проверки этого предположения в ходе освоения производства было принято решение провести анализ условий прокатки непрерывнолитых заготовок трех плавок, при этом каждая плавка была разделена на две части.

 ISSN 1991-7848

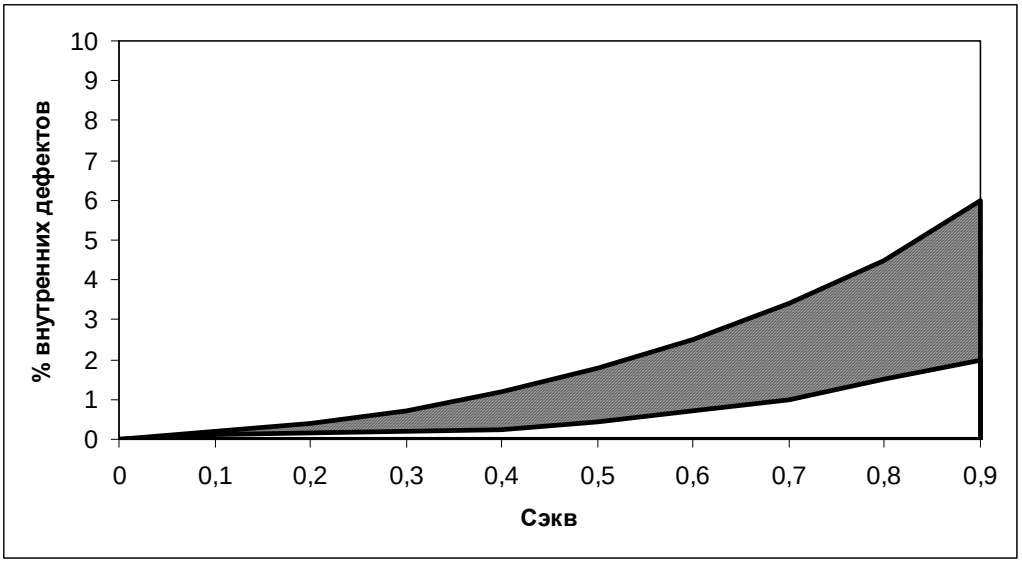


Рисунок 3 – Зависимость количества дефектов на внутренней поверхности труб от углеродного эквивалента стали

При прокатке первой опытной плавки использовали настройки прошивного стана, предусмотренные цеховой технологической инструкцией, при прокатке второй плавки было решено изменить температуру прошивки заготовок, а при прокате третьей плавки изменить и параметры настройки прошивного стана.

Нагрев непрерывнолитых заготовок производили в соответствии с требованиями нормативно-технической документации.

При прокатке плавок первых двух плавок использовали следующие значения параметров настройки прошивного стана:

- расстояние между валками 340 мм;
- расстояние между линейками 360 мм;
- выдвижение оправки за пережим 90 мм;
- температура прошивки составила 1180-1190єС;
- степень деформации перед носком оправки 11,8%;
- степень деформации в пережиме 14,5%;
- коэффициент овализации 1,067.

Очаг деформации с действующими по таблице прокатки настройками представлен на рисунке 4. При данных настройках прошивного стана металл в очаге деформации соприкасается с валком по всей поверхности, длина участка первичного захвата составляет 390 мм. Большая протяженность очага деформации до носка оправки обусловливает повышенные нагрузки на двигатель главного привода при прошивке, а значительная величина степени деформации перед носком оправки приводит к вскрытию внутренней полости перед носком оправки, что способствует повышенному образованию плен на внут-

ренней поверхности труб. При этих настройках прошивного стана количество труб отбракованных по внутренним пленам достигало максимальных значений.

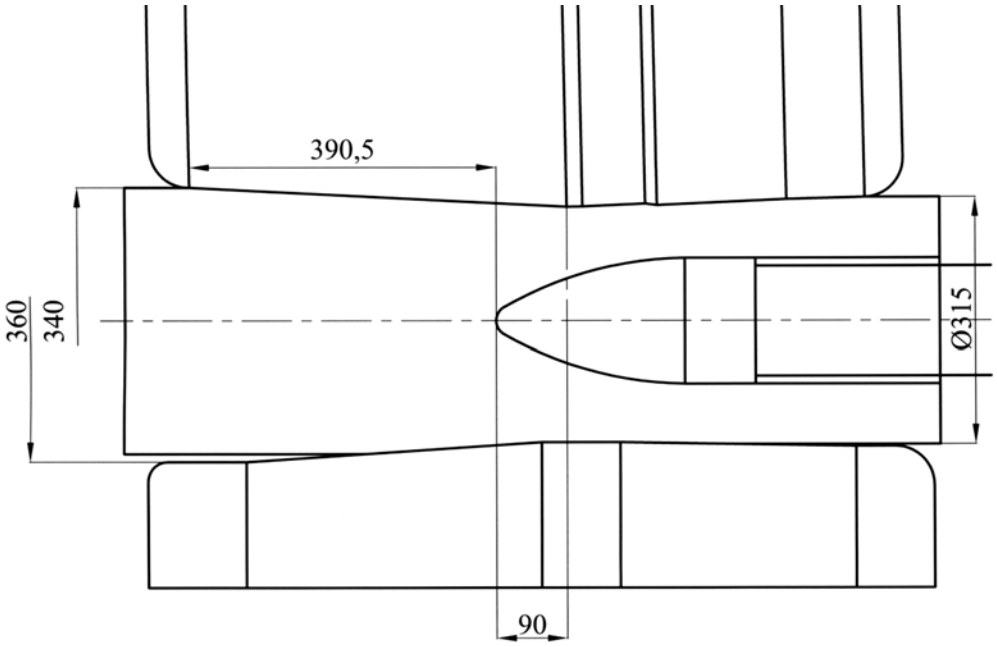


Рисунок 4 - Очаг деформации с действующими по таблице прокатки параметрами настройки прошивного стана

В связи с неудовлетворительным качеством труб, полученных прокаткой по существующей таблице прокатки, было решено изменить параметры настройки прошивного стана.

Заготовки из третьей плавки подвергали прошивке при следующих параметрах настройки стана:

- выдвижение носка оправки за пережим - 110 мм;
- расстояние между валками - 350 мм;
- расстояние между линейками - 365 мм;
- температура прошивки - 1180-1190^{0}С.

Очаг деформации с новыми настройками представлен на рисунке 5. С данными параметрами настройки прошивного стана, протяженность очага деформации до носка оправки уменьшается до 273 мм, что приводит к снижению нагрузки на двигатель, уменьшению степени деформации в сечении носка оправки до 8,2% и в пережиме валков до 11,5%. Такие деформационные условия способствуют снижению вероятности образования внутренней полости перед носком оправки, и тем самым уменьшению внутреннего пленообразования. Увеличенное расстояние между линейками повышает коэффициент

 ISSN 1991-7848

овализации очага деформации и тем самым снижает вероятность заката оправки в гильзу.

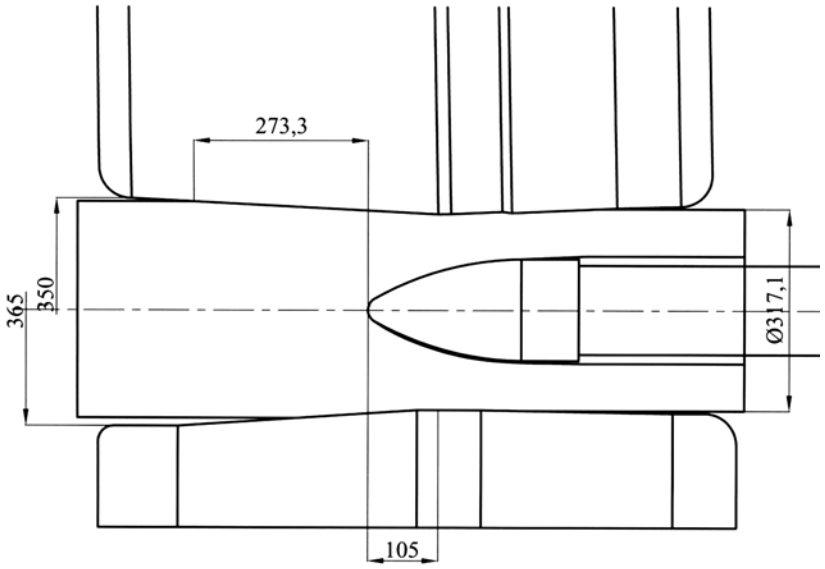


Рисунок 5 - Очаг деформации с рекомендуемыми параметрами настройки прошивного стана

В связи с конструктивными особенностями выходной стороны существующего прошивного стана, носок оправки был выдвинут за пережим валком на 105 мм. Температура прошивки гильз составила 1180-1190^{0}С, при этом токовая нагрузка на двигатель главного привода составила 4,6 кА и превышала допустимую (допустимая нагрузка 4,5 кА).

С целью уменьшения нагрузки на двигатель, было решено повысить температуру прошивки гильз до 1190-1210^{0}С и изменить настройку прошивного стана:

- расстояние между валками 345 мм;
- расстояние между линейками 360 мм;
- выдвижение носка оправки за пережим 105 мм;
- температура прошивки составила 1190-1200^{0}С;
- степень деформации перед носком оправки 8,2%;
- степень деформации в пережиме 11,5%;
- коэффициент овализации 1,05.

Была проведена прошивка трех гильз, при этом нагрузка на двигатель составила 4,1-4,3 кА, гильзы получились с повышенной кривизной, процесс прошивки проходил неустойчиво. Для повышения устойчивости процесса расстояние между валками уменьшили до 341 мм, расстояние между линейками уменьшили до 356 мм. Нагрузка на двигатель составила 4,5 кА. После увеличения температуры

прошивки гильз до значения 1200-1210^{0}С нагрузка снизилась до величины 4,2-4,4 кА.

После повышения температуры прошивки до 1200^{0}С восстановили настройку прошивного стана, с которой начинали эксперимент и продолжали прошивку гильз остальных заготовок. Нагрузка на двигатель составляла 4,0-4,3 кА.

Раскатку гильз проводили в соответствии с требованиями таблиц прокатки стальных бесшовных труб из непрерывнолитой заготовки. Нагрев трубных заготовок перед редуцированием и их редуцирование производили в соответствии с требованиями нормативно-технической документации. На участке ремонта все трубы были подвергнуты визуальному контролю качества наружной и внутренней поверхности, прямолинейности труб, контролю геометрических размеров.

Выводы

Из данных по качеству прокатанных труб из стали марки 25ХГМФА видно, что при прошивке гильз с экспериментальными настройками прошивного стана и последующей их раскатке и редуцировании количество плен на внутренней поверхности труб уменьшилось на 9,8-32,3%. Выход годной продукции вырос на 6,8-28,6%.

Таким образом, изменение температурно-деформационных условий на прошивном стане привело к существенному улучшению качества труб. Разработанные экспериментальные режимы рекомендованы к использованию при производстве труб из легированных марок сталей на ТПА с пилигримовым станом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фартушный Н.И., Гончарук А.В., Алексеев П.Л. Распределение температуры при прокатке труб на ТПА с пильгер-станом // Производство проката. - 2007.- №3.- С.29-31.
2. Сварка и свариваемые материалы: В 3х т., т. I, Свариваемость материалов. Справ. Изд./ Под ред. Э.Л.Макарова – М.: Металлургия, 1991, с. 528.

 ISSN 1991-7848

УДК 621.774.3

Меркулов Д.В.

КАЛИБРОВКА ОПРАВОК ДЛЯ ПРОШИВКИ ЗАГОТОВОК

Рассмотрены особенности расчета профиля и длины рабочей части прошивных оправок. Показаны реальные примеры использования одной и той же оправки для прошивки заготовок различного диаметра.

Розглянуто особливості розрахунку профілю та довжини робочої частини прошивних оправок. Наведено реальні приклади використання однієї і тієї ж оправки для прошивання заготовок різного діаметра.

Peculiarities of calculation of profile and length of the working part of piercing mandrels had been considered. The real examples of using the same mandrel for piercing the pipe workpieces of different diameter had been presented.

Введение

Проблема. Прошивные станы винтовой прокатки характеризуются использованием калиброванных валков и в качестве сменного инструмента оправок и направляющих линеек (роликов, дисков).

Ответственным инструментом прошивных станов является оправка, от калибровки которой в значительной степени зависит качество прошитых гильз и производительность процесса.

Оправки имеют четыре участка (рис. 1): носок 1, рабочий участок 2, калибрующий участок 3 и участок обратного конуса 4. На рабочем участке осуществляется основная деформация - раскатка стенки гильзы до необходимой толщины.

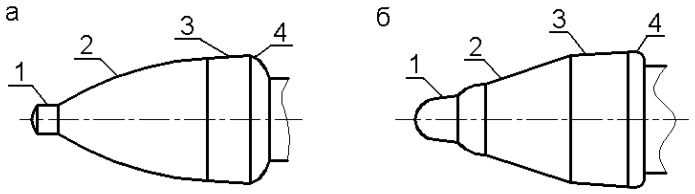


Рисунок 1 – Оправки для прошивки заготовок из углеродистых (а) и высоколегированных (б) сталей

Анализ исследований. Предпринималось несколько попыток теоретически определить оптимальный профиль рабочего участка оправки. П. Т. Емельяненко [1] была получена зависимость для расчета профиля рабочего участка оправки, выведенная из условия постоянства вытяжек вдоль очага деформации, О. А. Пляцковским была предложена зависимость, выведенная из условия постоянства относительного уменьшения площади. Решения П. Т. Емельяненко и О. А.

© МЕРКУЛОВ Д.В., 2008

Пляцковского были рассмотрены П. К. Тетериным [2], которым было показано, что они не удовлетворяют исходным предпосылкам.

П. К. Тетериным были получены уравнения кривой изменения толщины стенки по длине рабочего участка, отвечающие любому заданному закону распределения частного обжатия стенки и относительного частного обжатия стенки по длине очага деформации.

Достоинством работы [3] является рассмотрение изменения толщины стенки через шаг подачи, что и использовано в методике предлагаемой работы.

Цель. Целью предлагаемой работы является разработка методики расчета профиля рабочей части оправки с учетом физических особенностей циклического формоизменения прошиваемых заготовок различного размера и оценка обоснованности длины оправок.

Результаты исследований. Рассмотрим характер распределения деформаций на рабочем участке. Приведем полученные расчетным путем последовательные сечения очага деформации равные объему подачи Vц за половину оборота (рис. 2), при прошивке заготовки из углеродистой стали диаметром 150 мм в гильзу 155×9 мм для трубы 146×4,5 мм.

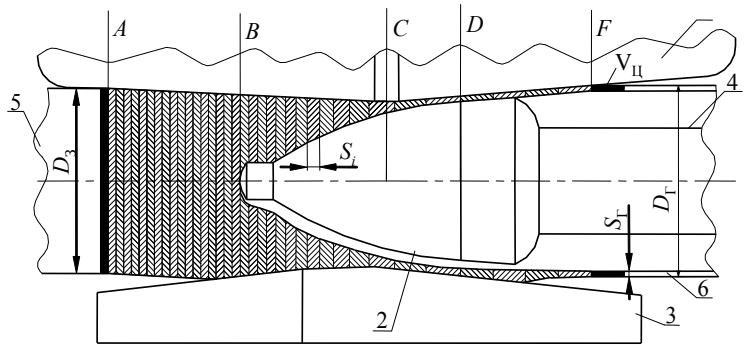


Рисунок 2 – Очаг деформации с шагами подач: 1 – валок, 2 – оправка, 3 – линейка, 4 – стержень оправки, 5 – заготовка, 6 – гильза.

Если выделить одно из таких сечений (сечение В на рис.2) прошиваемой заготовки, то оно будет деформироваться за несколько циклов, что аналогично, по мнению П.К. Тетерина, непрерывной продольной прокатке полосы в нескольких клетях. В этом случае при распределении деформаций исходят из абсолютного или относительного обжатия по толщине стенки. Следовательно, в качестве возможных критериев изменения толщины стенки по длине рабочей части оправки могут быть приняты постоянство
абсолютного обжатия

$$\Delta S_i = a = \text{const}, \qquad (1)$$

 ISSN 1991-7848

относительного обжатия

$$\frac{\Delta S_i}{S_{i-1}} = \frac{S_i - S_{i-1}}{S_{i-1}} = b = \text{const}, \quad (2)$$

истинного обжатия

$$\ln \frac{S_i}{S_{i-1}} = c = \text{const}. \quad (3)$$

В работах некоторых авторов в качестве возможного критерия принято постоянство относительного изменения площади или, что то же самое постоянство вытяжек

$$\frac{\Delta F_i}{F_i} = d = \text{const}. \quad (4)$$

Из рис. 2 видно, что толщина стенки должна уменьшаться и, следовательно, критерий (1) не может быть принят в качестве оптимального, так как не учитывает форму очага деформации.

Найдем связь между относительной и истинной деформацией. Из выражения (3)

$$S_i = e^c \cdot S_{i-1}. \quad (5)$$

Подставив соотношение (5) в выражение (2), получим

$$\frac{S_{i-1} - e^c \cdot S_{i-1}}{S_{i-1}} = 1 - e^c,$$

$$b = 1 - e^c. \quad (6)$$

Из формулы (6) следует что критерии (2) и (3) могут быть выражены одно через другое, т.е. если b=const, то и c=const.

В качестве примера на рис. 3 приведены зависимость изменения толщины стенки (кривая 1) и зависимости (1) – (3) (кривая 2-4) по длине рабочей части заводской оправки. Очевидно, что существующая форма рабочей части оправки не обеспечивает постоянства ни одной из зависимостей (1) – (3).

Определение профиля рабочей части оправок

Для теоретического нахождения оптимального профиля необходима замкнутая система уравнений, одним из которых является закон распределения изменения толщины стенки по длине очага деформации за шаг подачи. Это можно представить в виде [4]

$$\Delta S(x) = \int_x^{x+l(x)} d(R_3(x) - r_{\text{опр}}(x)).$$

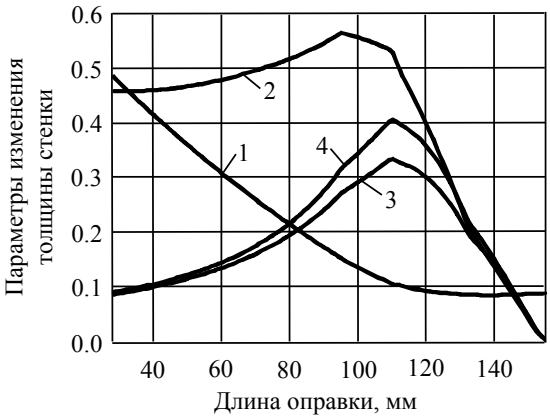


Рисунок 3 – Распределение значений S_i (1), $\frac{\Delta S_i}{10}$ (2), $\frac{\Delta S_i}{S_{i-1}}$ (3) и $\ln\frac{S_i}{S_{i-1}}$ (4) по длине рабочей части заводской оправки при прошивки заготовок диаметром 150 мм в гильзу 155×9 мм на ТПА 220 ”ПНТЗ” (углеродистые стали)

В приведенном уравнении неизвестными являются распределение шагов подачи $l(x)$ и радиус оправки $r_{\text{опр}}(x)$. Это уравнение можно дополнить выражением, отражающим постоянство объема подач, которое может быть записано в виде

$$V_0 = \int_x^{x+l(x)} \pi\xi(x)(R_3^2(x) - r_{\text{опр}}^2(x))dx.$$

Решение этой системы в общем случае аналитически получить затруднительно, а для ее решения могут быть использованы различные численные методы.

В предлагаемой работе сделана попытка с использованием параметров циклического формоизменения определить оптимальный профиль рабочего участка с учетом физических особенностей процесса винтового движения прошиваемой заготовки [5].

В качестве критерия для оптимизации профиля рабочей части оправки был принят закон (3) постоянства относительных обжатий по толщине стенки вдоль очага деформации.

Получим зависимость радиуса оправки от положения сечения. Представим S_i в виде $S_i = R_{3i} - r_{\text{опр}i}$, где R_{3i}, $r_{\text{опр}i}$ – радиусы заготовки и оправки в i – ом сечении. Тогда

$$\Delta S_i = (R_{3i-1} - r_{\text{опр}i-1}) - (R_{3i} - r_{\text{опр}i}) = R_{3i-1} - R_{3i} - (r_{\text{опр}i-1} - r_{\text{опр}i}),$$

а $S_{i-1} = R_{3i-1} - r_{\text{опр}i-1}$.

Подставляя ΔS и $S_{i\text{-}1}$ в (2) и выражая $r_{\text{опр}i}$, получим

$$r_{\text{опр}i} = R_{3i} + (b-1)(R_{3i-1} - r_{\text{опр}i-1}). \qquad (7)$$

 ISSN 1991-7848

Если принять в качестве критерия закон (3) и провести аналогичные преобразования, то получим

$$r_{\text{опр}i+1} = R_{3i+1} - \frac{R_{3i} - r_{\text{опр}i}}{e^c}. \qquad (8)$$

Используя формулу (8) так же можно построить итерационный цикл.

Для нахождения искомых профилей необходимо знать величину относительного или истинного обжатия. Найдем величины относительного и истинного обжатий.

По известным значениям толщины стенки в начале $S_{\text{н}}$ и конце $S_{\text{к}}$ рабочего участка оправки находим суммарное истинное обжатие:

$$c_{\Sigma} = \ln \frac{S_{\text{н}}}{S_{\text{к}}}.$$

Зная число шагов n, находим среднее истинное обжатие:

$$c = \frac{c_{\Sigma}}{n}.$$

Из величины истинного обжатия можно найти величину относительного обжатия.

В качестве примера на рис. 4 показан профиль рабочего участка оправки диаметром 126 мм для прошивного стана 220 ОАО “ПНТЗ” (размеры заготовки и гильзы приведены выше).

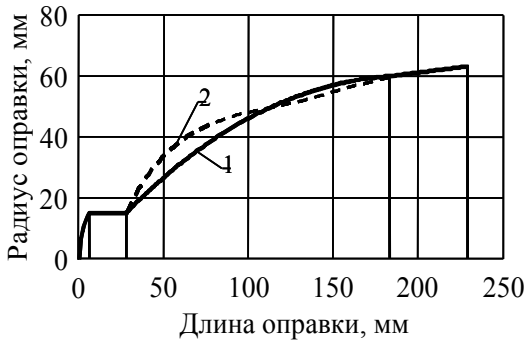


Рисунок 4 – Заводской 1 и предлагаемый 2 профили рабочей части оправок для прошивки заготовок из углеродистых сталей

Используя рассчитанный профиль рабочей части оправки, определили изменение толщины стенки и зависимости (1) – (3) по длине рабочей части заводской оправки (рис. 5). Из графиков видно, что при предлагаемом профиле рабочего участка законы (2) и (3) выполняются, а зависимость (2) монотонно убывает.

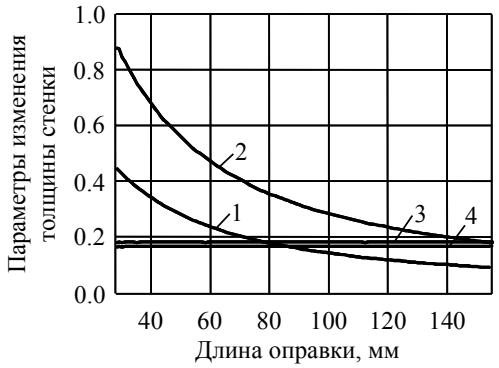


Рисунок 5 – Распределение значений S_i (1), $\frac{\Delta S_i}{10}$ (2), $\frac{\Delta S_i}{S_{i-1}}$ (3) и $\ln\frac{S_i}{S_{i-1}}$ (4) по длине рабочей части предлагаемой оправки при прошивке заготовок (условия те же, что и на рис. 3)

Для сравнения рабочих частей заводской и рассчитанной оправок определяли значение коэффициента Одквиста на шаге подачи, распределение которого показано на рис. 6.

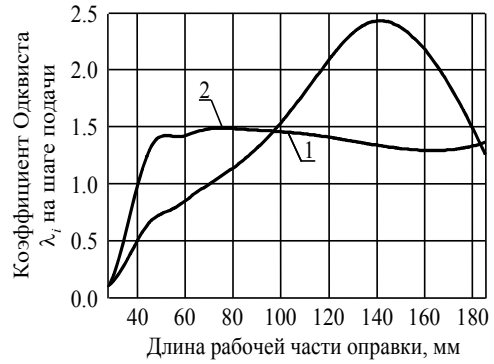


Рисунок 6 – Распределение коэффициента Одквиста на шаге подачи по длине заводской (1) и предлагаемой (2) оправок

Анализ кривых на рис. 6 показывает заметное отличие накопленной степени деформации сдвига на шаге подачи на оправках с разным профилем рабочей части (см. рис. 4). Для высоколегированных сталей, обладающих пониженной пластичностью, снижение λ_i на шаге подачи (см. кривую 2 на рис. 6) должно способствовать уменьшению склонности к образованию поверхностных дефектов на гильзах.

Расчет длины рабочей части оправок

Длина оправки, участвующая в деформации, имеет вид (рис. 7)

$$l_{\text{о}} = l_{\text{н}} + l_{\text{раб}} + l_{\text{к}},$$

или

$$l_{\text{о}} = l_1 + k + l_2, \qquad (9)$$

 ISSN 1991-7848

где $l_{\text{н}}$ – длина носка оправки; $l_{\text{раб}}$ – длина рабочего участка оправки; $l_{\text{к}}$ – длина калибрующего участка оправки; l_1 – длина оправки в конусе прошивки; k – ширина цилиндрического участка валка; l_2 – длина оправки в конусе раскатки.

Размер получаемой гильзы зависит от положения в очаге деформации участка $l_{\text{к}}$ оправки (рис. 7), т. е. от значения величины l_2 при определенном обжатии заготовки в пережиме $u_{\text{п}}$. Для получения требуемого диаметра гильзы длина оправки в конусе раскатки должна составлять:

$$l_2 = \frac{d_{\text{опр}} + 2S_{\text{г}} - D_3\left(1 - \dfrac{u_{\text{п}}}{100}\right)}{2\,\text{tg}\varphi_2}, \qquad (10)$$

где φ_2 - угол выходного конуса валков; $d_{\text{опр}}$ - диаметр оправки; S_{Γ} - толщина стенки гильзы; D_3 - диаметр заготовки.

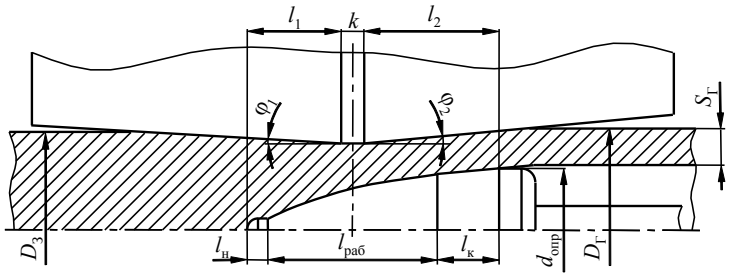


Рисунок 7 – Схема для расчета длины оправки

Устойчивость процесса прошивки и качество получаемой гильзы обеспечиваются величиной обжатия заготовки u_0 перед носком оправки, и длиной участка оправки в конусе прошивки:

$$l_1 = \frac{D_3(u_{\text{п}} - u_0)}{2\,\text{tg}\varphi_1 \cdot 100}, \qquad (11)$$

где φ_1 - угол входного конуса валков.

В выражениях (10) и (11):

$$u_0 = \frac{D_3 - D_0}{D_3} \cdot 100\%, \;\; u_{\text{п}} = \frac{D_3 - b}{D_3} \cdot 100\%,$$

С учетом рассмотренных соотношений требуемая по настроечным условиям (9) длина оправки, участвующая в деформации, составит [1, 2]:

$$l_0 = \frac{D_3(u_{\text{п}} - u_0)}{2\,\text{tg}\,\varphi_1 \cdot 100} + k + \frac{d_{\text{опр}} + 2S_{\Gamma} - D_3\left(1 - \dfrac{u_{\text{п}}}{100}\right)}{2\,\text{tg}\varphi_2}. \qquad (12)$$

Для данных калибровок валков (φ_1, φ_2, k), диаметров оправки $d_{\text{опр}}$ и заготовки $D_{\text{З}}$ и толщины стенки гильзы $S_{\text{Г}}$ из выражения (6) можно получить требуемую длину оправки, участвующую в деформации, если задать требуемые значения обжатий u_0 и $u_{\text{п}}$.

В табл. 1 приведён пример использования оправки с $d_{\text{опр}} = 72$ мм, которая применяется для прошивки заготовок четырёх различных размеров.

Таблица 1

Настройки стана для $d_{\text{опр}} = 72$ мм

Размеры, мм			Расстояние, мм, в пережиме между		Установка стержня оправки, мм
трубы	гильзы	заготовки	валками	линейками	
89×5	95×8,5	95	85	91	177
95×9	102×13	100	90	97	162
102×13	109×16	105	95	102	147
108×17	115×19	110	99	108	132

Для каждого из этих случаев по методике работ [4, 5] были построены профили (рис. 8), обеспечивающие закон изменения толщины стенки по условию $\frac{\Delta S_i}{S_i} = \text{const}$.

Использование одного из профилей для всех случаев не позволяет выполнить условие $\frac{\Delta S_i}{S_i} = const$ (рис. 9), хотя очевидно, что для заводских условий оправка с $d_{\text{опр}} = 72$ мм может быть только одна для всех прошиваемых заготовок (см. табл.1).

Для всех случаев с использованием математической модели были определены параметры циклического формоизменения, число шагов подачи N (табл. 2) и накопленная степень деформации сдвига Λ_Σ (табл. 3).

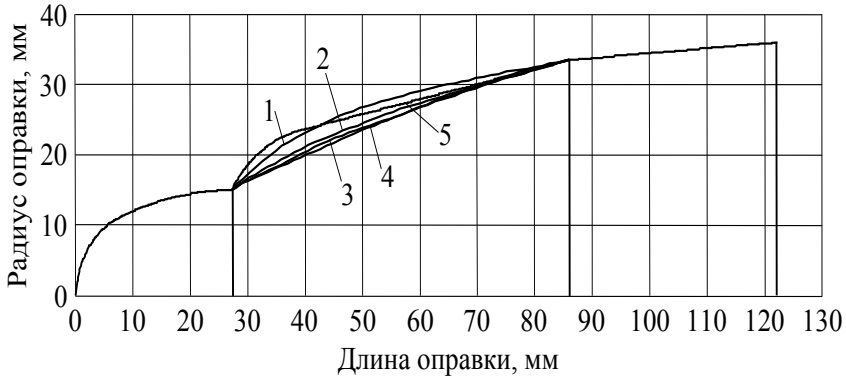


Рисунок 8 – Профили рабочей части оправок для прошивки заготовок с профилем $\frac{\Delta S_i}{S_{i-1}} = \text{const}$ для гильз, мм: 1 – 95×8.5, 2 – 102×13, 3 – 109×16, 4 – 115×19 и 5 – заводская №19

 ISSN 1991-7848

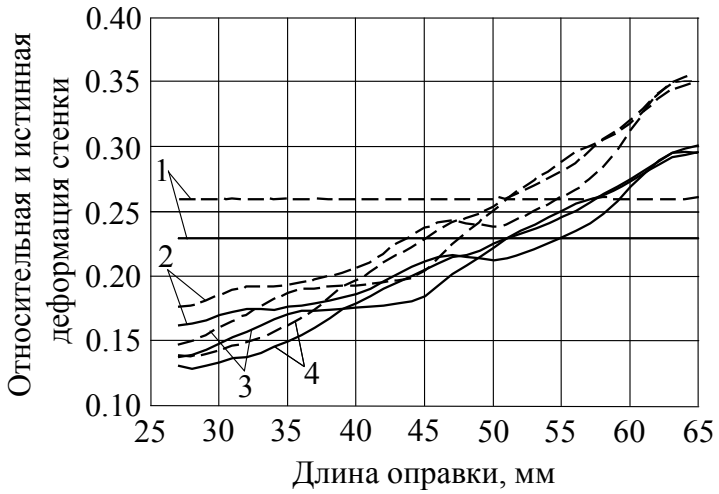


Рисунок 9 – Изменение деформации стенки ($\frac{\Delta S_i}{S_{i-1}}$ - сплошные линии; $\ln\frac{S_i}{S_{i-1}}$ - пунктирные линии) при прошивке заготовки $D_З$=95 мм в гильзу 95×8.5 мм по длине оправки с профилем для гильз: 1 – 95×8.5; 2 - 102×13; 3 - 109×16; 4 - 115×19 мм

Таблица 2

Число шагов N до пережима валков (верхние строчки), до начала калибрующего участка оправки (средние строчки) и до выхода гильзы из валков (нижние строчки)

Гильза	Оправка				
	заводская№19	профиль оправки, рассчитанный для гильзы			
		95×8,5	102×13	109×16	115×19
95×8,5	14,81	14,76	15,02	15,08	15,12
	15,71	15,67	15,92	15,99	16,05
	18,68	19,20	19,45	19,51	19,57
102×13	10,05	10,04	10,16	10,19	10,21
	11,62	11,59	11,74	11,78	11,82
	14,50	14,47	14,62	14.66	14,69
109×16	8,47	8,47	8,54	8,56	8,58
	10,24	10,22	10,33	10,36	10,39
	13,19	13,18	13,29	13,31	13,34
115×19	8,23	8,24	8,27	8,28	8,29
	10,56	10,54	10,63	10,65	10,67
	13,33	13,31	13,40	13,42	13,44

Выводы

Разработан новый метод определения профиля и длины рабочей части оправок для прошивки заготовок.

Профиль рабочей части оправок можно определять для любого закона изменения толщины стенки, формируемой на этом участке оправки. В работе использован закон постоянства относительного обжатия в каждом цикле.

Таблица 3

Накопленная степень деформации сдвига Λ_Σ до пережима валков (верхние строчки), до начала калибрующего участка оправки (средние строчки) и до выхода гильзы из валков (нижние строчки)

Гильза	Оправка				
	заводская№19	профиль оправки, рассчитанный для гильзы			
		95×8,5	102×13	109×16	115×19
95×8,5	12,26	12,35	10,79	10,65	10,48
	13,64	13,81	13,48	13,44	12,50
	15,18	15,16	15,17	15,11	15,07
102×13	7,38	7,36	7,03	6,90	6,88
	10,37	10,50	10,13	10,06	10,05
	11,13	11,08	11,06	11,06	11,06
109×16	6,39	6,52	6,16	6,07	5,96
	8,83	8,85	8,60	8,53	8,50
	10,03	9,98	9,98	9,97	9,97
115×19	4,17	4,04	3,92	3,88	3,85
	7,07	6,97	7,27	7,24	7,20
	7,88	7,90	7,82	7,82	7,79

Предложенный метод определения профиля рабочей части оправки позволяет получить профиль с заданным законом изменения толщины стенки. Предлагаемый профиль способствует снижению степени деформации сдвига по длине очага деформации, что благоприятно влияет на пластичность материала прошиваемой заготовки.

Разработанные рекомендации использованы в построении нормали оправок для реальных прошивных станов ОАО “ПНТЗ”.

Промышленное опробование подтвердило возможность уменьшить скольжение металла в осевом направлении и повысить скорость прошивки. Результаты согласуются с выводами, полученными при исследованиях с использованием метода электрогидродинамических аналогий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Емельяненко П.Т. Теория косой и пилигримовой прокатки. – М: Металлургиздат, 1949. –402 с.
2. Тетерин П.К. Теория поперечно-винтовой прокатки. –М.: Металлургия, 1983. -270 с.
3. Тетерин П.К. Калибровка оправок прошивных станов // В сб. “Обработка метолов давлением”, вып. 3. – М.: Металлургиздат, 1954. – С. 254-267.
4. Голубчик Р.М., Меркулов Д.В., Новиков М.В., Титова С.В., Чепурин М.В. Совершенствование профиля рабочей части оправки для прошивки заготовок // Известия ВУЗов. «Черная металлургия». – 2002. – № 11. – С. 30-33.
5. Меркулов Д.В., Титова С.В., Новиков М.В., Чепурин М.В., Голубчик Р.М. Использование параметров циклического формоизменения для определения профиля рабочей части прошивных оправок // Технология металлов. – 2002. – № 2. – С. 5-8.

 ISSN 1991-7848

УДК 621.774.3

Панюшкин Е.Н., Данченко В.Н., Кондратьев С.В.,
Панюшкин Н.Е, Скоромный С.А.

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ И РЕЖИМОВ РАБОТЫ СИСТЕМЫ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО УТОНЕНИЯ КОНЦЕВЫХ УЧАСТКОВ "ЧЕРНОВЫХ" ТРУБ В НЕПРЕРЫВНОМ СТАНЕ ТПА 30-102

Статья посвящена разработке методики определения параметров работы системы предварительного утонения концевых участков "черновых" труб в непрерывном стане ТПА 30-102, в том числе времени и скорости перемещения валков 6-ой и 7-ой его клетей.

Стаття присвячена розробці методики визначення параметрів роботи системи попереднього стоншення кінцевих ділянок "чорнових" труб у безперервному стані ТПА 30-102, у тому числі часу й швидкості переміщення валків 6-ий і 7-ий його клітей.

The article is devoted development of method by work parameters determination for the system of preliminary wall thickness diminishing on the end areas of "draft" pipes in the continuous mill of TPA 30-102, including time and speed of rolls moving in 6th and 7th his cages.

Введение

Известно [1], что редуцирование труб с натяжением сопровождается утолщением стенки переднего и заднего концов труб, связанного с условиями их прокатки в процессе заполнения и освобождения металлом редукционного стана.

Анализ исследований. Уменьшить длину переднего и заднего утолщенных концов после редуцирования можно:

- варьированием скоростного режима работы редукционного стана во время заполнения и освобождения стана металлом, при этом следует стремиться к условиям прокатки, когда:

$$S_{УПК}^{тор} \approx S_{УПК}^{тор} \approx S_{тр};$$

- прокаткой в редукционном стане "черновых" труб с переменной величиной толщины стенки от $S_{УПК}^{тор.н.ст}$ и $S_{УЗК}^{тор.н.ст}$ на их передних и задних концах, увеличивающейся до $S_{н.ст}$ на протяженности $L_{УПК}^{н.ст.}$ и $L_{УЗК}^{н.ст.}$ соответственно.

Следует обратить внимание, что редукционный стан ТПА 30-102 имеет дифференциально-групповой привод, и управление скоростными режимами прокатки труб в процессе заполнения и освобождения стана металлом малоэффективно для уменьшения длин утолщенных концов. Поэтому, на этом агрегате наиболее целесообразно осуществлять подготовку концов труб в непрерывном оправочном стане.

© ПАНЮШКИН Е.Н., ДАНЧЕНКО В.Н., КОНДРАТЬЕВ С.В., ПАНЮШКИН Н.Е, СКОРОМНЫЙ С.А., 2008

Проблема. Для эффективной подготовки концевых участков "черновых" труб в непрерывном оправочном стане необходимо знать требуемые режимы перемещения верхних валков его 6-ой и 7-ой клетей.

Результаты исследований. Величина концевого утолщения стенки трубы, а также длины концов труб с указанными утолщениями существенно зависят от величины обжатия диаметра труб в редукционном стане, суммарного натяжения по клетям, температуры прокатки, а также величин исходной и конечной разностенностей готовых труб.

Толщина стенки трубы на торце переднего утолщенного конца готовой трубы после редуцирования будет:

$$S_{УПК}^{тор} = S_{тр}\sqrt{\frac{D_{н.ст}}{D_{тр}}}. \quad (1)$$

Толщина стенки на торце заднего утолщенного конца готовой трубы:

$$S_{УЗК}^{тор} = 1.03 \cdot S_{тр}\sqrt{\frac{D_{н.ст}}{D_{тр}}}. \quad (2)$$

Тогда толщина стенки трубы в месте обрезки переднего утолщенного конца:

$$S_{УПК}^{рез} = S_{тр}, \quad (3)$$

а в месте обрезки заднего утолщенного конца:

$$S_{УЗК}^{рез} = 1.03 \cdot S_{тр}. \quad (4)$$

Средняя по длине переднего утолщенного конца толщина стенки:

$$S_{срУПК} = \frac{S_{УПК}^{тор} + S_{УПК}^{рез}}{2}, \quad (5)$$

а для заднего утолщенного конца:

$$S_{срУЗК} = \frac{S_{УЗК}^{тор} + S_{УЗК}^{рез}}{2}. \quad (6)$$

Объем металла трубной заготовки, соответствующий в утолщенным концам:

- переднего: $Q_{УПК} = \pi \cdot \left(D_{тр} - S_{срУПК}\right) \cdot S_{срУПК} \cdot L_{УПК}$; (7)
- заднего: $Q_{УЗК} = \pi \cdot \left(D_{тр} - S_{срУЗК}\right) \cdot S_{срУЗК} \cdot L_{УЗК}$, (8)

где $L_{УПК}$ и $L_{УЗК}$ - длины утолщенных концов готовых труб.

Тогда часть длины заготовки, идущей в отходы с утолщенными концами, будет:

$$L_{загУПК+УЗК} = \frac{4 \cdot \left(Q_{УПК} + Q_{УЗК}\right)}{\pi \cdot D_{заг}^2}. \quad (9)$$

Расчет режима утонения концевых участков "черновых" труб включает в себя два этапа:

 ISSN 1991-7848

- определение протяженности подготовленных концевых участков и толщины стенки на их торцах после прокатки "черновой" трубы;

- определение величины и скорости перемещения верхнего валка шестой и седьмой клети непрерывного стана, обеспечивающие получение необходимых геометрических размеров концевых участков "черновых" труб.

Из условий устойчивости контура поперечного сечения на торцах "черновой" трубы следует ввести ограничение минимальной величины толщины стенки на торцах подготовленных концов "черновых" труб после прокатки, например, приняв:

$$S_{минУПК}^{тор.н.ст.} = S_{минУЗК}^{тор.н.ст.} = 2.5мм .$$

В случае полного исключения образования утолщенных концов, величина перемещения верхних валков 6 и 7 клетей непрерывного оправочного стана должна составлять:

- при прокатке переднего конца "черновой" трубы:

$$H_{УПК} = 2 \cdot \left(S_{н.ст} - \frac{S_{тр}}{\sqrt{\frac{D_{н.ст}}{D_{тр}}}} \right); \qquad (10)$$

- при прокатке заднего конца "черновой" трубы:

$$H_{УЗК} = 2 \cdot \left(1.03 \cdot S_{н.ст} - \frac{1.03 \cdot S_{тр}}{\sqrt{\frac{D_{н.ст}}{D_{тр}}}} \right). \qquad (11)$$

При этом, для переднего утоненного конца "черновой" трубы толщина стенки на торце будет:

$$S_{УПК}^{тор.н.ст.} = S_{н.ст} - \frac{H_{УПК}}{2} \geq S_{минУПК}^{тор.н.ст.} \geq 2.5мм . \qquad (12)$$

Если это условие не выполняется, то принимают: $S_{УПК}^{тор.н.ст.} = S_{минУПК}^{тор.н.ст.} = 2.5мм$, а величину перемещения верхних валков 6 и 7 клетей непрерывного стана ограничивают величиной:

$$H_{УПК}^{огр} = 2 \cdot \left(S_{н.ст} - S_{минУПК}^{тор.н.ст.} \right). \qquad (13)$$

Аналогично для заднего утоненного конца "черновой" трубы толщина стенки на заднем его торце будет:

$$S_{УЗК}^{тор.н.ст.} = 1.03 \cdot S_{н.ст} - \frac{H_{УЗК}}{2} \geq S_{минЗУК}^{тор.н.ст.} \geq 2.5мм . \qquad (14)$$

Если это условие не выполняется, то принимают: $S_{УЗК}^{тор.н.ст.} = S_{минУЗК}^{тор.н.ст.} = 2.5мм$, а величину перемещения верхних валков 6 и 7 клетей непрерывного стана ограничивают величиной:

$$H_{УЗК}^{огр} = 2 \cdot \left(1.03 \cdot S_{н.ст} = S_{минУЗК}^{тор.н.ст.}\right). \quad (15)$$

Средний коэффициент вытяжки металла в редукционном стане:

- при образовании переднего утолщенного конца:

$$\mu_{срУПК} = \frac{\left(D_{н.ст} - S_{н.ст}\right) \cdot S_{н.ст}}{\left(D_{тр} - S_{срУПК}\right) \cdot S_{срУПК}}. \quad (16)$$

- при образовании заднего утолщенного конца:

$$\mu_{срУЗК} = \frac{\left(D_{н.ст} - 1.03 \cdot S_{н.ст}\right) \cdot 1.03 \cdot S_{н.ст}}{\left(D_{тр} - S_{срУЗК}\right) \cdot S_{срУЗК}}. \quad (17)$$

При известных величинах длин переднего $L_{УПК}^{н.ст.}$ и заднего $L_{УЗК}^{н.ст.}$ утолщенных концов готовых труб, протяженность подготовленного переднего конца "черновой" трубы:

$$L_{УПК}^{н.ст.} = \frac{L_{УПК}}{\mu_{срУПК}}, \quad (18)$$

а заднего:

$$L_{УЗК}^{н.ст.} = \frac{L_{УЗК}}{\mu_{срУЗК}}. \quad (19)$$

Средняя толщина стенки на переднем подготовленном (утоненном) конце "черновой" трубы будет:

$$S_{срУПК}^{н.ст} = \frac{S_{н.ст} + S_{УПК}^{тор.н.ст}}{2}. \quad (20)$$

Наружный диаметр, соответствующий средней толщине стенки на переднем подготовленном (утоненном) конце "черновой" трубы будет:

$$D_{ср.УПК} = D_o + 2 \cdot S_{срУПК}^{н.ст}, \quad (21)$$

где: D_o – диаметр оправки, мм.

Наружный диаметр торца переднего утоненного конца "черновой" трубы будет:

$$D_{\min.УПК}^{тор.н.ст} = D_o + 2 \cdot S_{УПК}^{тор}. \quad (22)$$

Максимальный суммарный коэффициент вытяжки в 6 и 7 клетях при утонении переднего конца "черновой" трубы:

$$\mu_{\max УПК\,6,7}^{н.ст} = \frac{\left(D_{н.ст.5} - S_{н.ст.5}\right) \cdot S_{н.ст.5}}{\left(D_{\min УПК}^{тор.н.ст} - S_{УПК}^{тор}\right) \cdot S_{УПК}^{тор}} \quad (23)$$

Средний суммарный в 6 и 7 клетях коэффициент вытяжки при утонении переднего конца "черновой" трубы:

 ISSN 1991-7848

$$\mu^{н.ст}_{срУПК_{6,7}} = \frac{\left(D_{н.ст.5} - S_{н.ст.5}\right)\cdot S_{н.ст.5}}{\left(D_{срУПК} - S^{н.ст}_{срУПК}\right)\cdot S^{н.ст}_{срУПК}}. \qquad (24)$$

Для определения скорости перемещения верхнего валка 6 и 7 клетей непрерывного стана необходимо определить время прокатки участка переднего конца "черновой" трубы, подлежащего утонению в этих клетях.

Примем, что максимальный и средний коэффициенты вытяжки $\mu^{н.ст}_{\max УПК_{6,7}}$ и $\mu^{н.ст}_{срУПК_{6,7}}$ распределяется между 6 и 7 клетями непрерывного стана следующим образом:

$$\begin{aligned}
\mu^{н.ст}_{\max УПК_6} &= \sqrt[3]{\mu^{н.ст}_{\max УПК_{6,7}}}^{2};\\
\mu^{н.ст}_{\max УПК_7} &= \sqrt[3]{\mu^{н.ст}_{\max УПК_{6,7}}};\\
\mu^{н.ст}_{срУПК_6} &= \sqrt[3]{\mu^{н.ст}_{срУПК_{6,7}}}^{2};\\
\mu^{н.ст}_{срУПК_7} &= \sqrt[3]{\mu^{н.ст}_{срУПК_{6,7}}}.
\end{aligned} \qquad (25)$$

Тогда максимальная скорость выхода металла из 6-ой клети непрерывного стана:

$$V^{\max}_{выхУПК_6} = V_{вых5}\cdot\mu^{н.ст}_{\max УПК_6}, \qquad (26)$$

а максимальная частота вращения её валков должна быть:

$$n^{\max}_{вУПК_6} = \frac{V^{\max}_{выхУПК_6}\cdot 60\cdot 1000}{\pi\cdot\left(D_{кат6} - H_{УПК_6}\right)}. \qquad (27)$$

Вытяжка в 6-ой клети к моменту окончания утонения переднего конца "черновой" трубы в ней:

$$\mu^{const}_6 = \frac{\left(D_{н.ст5} - S_{н.ст5}\right)\cdot S_{н.ст5}}{\left(D_{н.ст6} - S_{н.ст6}\right)\cdot S_{н.ст6}}. \qquad (28)$$

Скорость выхода металла при этом будет $V^{const}_{выхУПК_6} = V_{вых5}\cdot\mu^{const}_6$, а частоту вращения валков этой клети необходимо уменьшить до:

$$n^{const}_{в\ 6} = \frac{V^{const}_{вых\ 6}\cdot 60\cdot 1000}{\pi\cdot D_{кат6}}. \qquad (29)$$

Средняя скорость выхода металла из 6-ой клети будет:

$$V^{ср}_{выхУПК_6} = \frac{V^{\max}_{выхУПК_6} + V^{const}_{вых\ 6}}{2}. \qquad (30)$$

Длина переднего утоненного (подготовленного) конца "черновой" трубы после 6-ой клети будет:

$$L^{н.ст.}_{УПК_6} = \frac{L^{н.ст}_{УПК}}{\mu^{н.ст}_{срУПК7}}. \qquad (31)$$

Время перемещения верхнего валка 6-ой клети при утонении (подготовке) переднего конца "черновой" трубы будет:

$$t_{УПК6} = \frac{L_{УПК6}^{н.ст}}{V_{выхУПК6}^{ср}}. \qquad (32)$$

В течение этого времени следует линейно снижать частоту вращения валков 6-ой клети непрерывного стана от частоты вращения $n_{вУПК6}^{max}$ до частоты вращения $n_{в6}^{const}$, соответствующей расчетным для применяемой калибровки валков непрерывного стана.

Искомая скорость перемещения верхнего валка 6-ой клети при утонении (подготовке) переднего конца "черновой" трубы будет:

$$v_{УПК6} = \frac{H_{УПК}}{t_{УПК6}}. \qquad (33)$$

По аналогичным зависимостям можно определить параметры настройки системы подготовки переднего конца черновой трубы в 7-ой клети непрерывного стана.

Таким образом, для получения переднего конца "черновой" трубы требуемого профиля получили следующие технологические параметры:

- величину предварительного (перед началом прокатки гильзы) сведения валков 6-ой и 7-ой клетей H_6 и $H_7 = H_{УПК}$, мм;

- величину предварительной (перед началом прокатки гильзы) установки частоты вращения валков 6-ой и 7-ой клетей $n_{вУПК6}^{\max}$ и $n_{вУПК7}^{\max}$, об/мин;

- время с момента начала прокатки, в течение которого следует разводить валки и снижать, до оговоренной калибровкой, частоту вращения валков 6-ой и 7-ой клетей $t_{УПК6}$ и $t_{УПК7}$, с;

- скорость разведения валков 6-ой и 7-ой клетей $v_{УПК6}$ и $v_{УПК7}$, мм/с;

- время $t_{6,7}$, после истечения которого с момента начала прокатки в 6-ой клети следует начинать перемещение верхнего валка 7-ой клети.

При подготовке (утонении) толщины стенки на заднем конце "черновых" труб верхние валки 6-ой и 7-ой клетей непрерывного оправочного стана сводят на величину $H_{УЗК}$. Так как при сведении валков начинает увеличиваться вытяжка металла, то снижается скорость входа металла в ту клеть, валки которой сближаются. При подготовке (утонении) толщины стенки на заднем конце "черновых" труб вначале сводят валки 6-ой клети, а затем валки 7-ой клети.

Величины толщин стенок и диаметров на торцах утоненных (подготовленных) передних и задних концов "черновых" труб должны быть равны, т.е.:

$$S_{\min УЗК}^{тор.н.ст} = S_{\min УПК}^{тор.н.ст},$$
$$D_{\min УЗК}^{тор.н.ст} = D_{\min УПК}^{тор.н.ст}. \qquad (34)$$

 ISSN 1991-7848

Максимальный суммарный коэффициент вытяжки в 6-ой и 7-ой клетях при утонении заднего конца "черновой" трубы:

$$\mu^{н.ст}_{\max УЗК\,6,7} = \frac{\left(D_{н.ст.5} - 1{,}03 \cdot S_{н.ст.5}\right) \cdot 1{,}03 \cdot S_{н.ст.5}}{\left(D^{тор.н.ст}_{\min УЗК} - S^{тор.н.ст}_{\min УЗК}\right) \cdot S^{тор.н.ст}_{\min УЗК}} \qquad (35)$$

Средняя толщина стенки на заднем подготовленном (утоненном) конце "черновой" трубы будет:

$$S^{н.ст}_{срУЗК} = \frac{1{,}03 \cdot S_{н.ст} + S^{тор.н.ст}_{УЗК}}{2}. \qquad (36)$$

Наружный диаметр, соответствующий средней толщине стенки на заднем подготовленном (утоненном) конце "черновой" трубы будет:

$$D_{ср.УЗК} = D_o + 2 \cdot S^{н.ст}_{срУЗК}. \qquad (37)$$

Средний суммарный в 6 и 7 клетях коэффициент вытяжки при утонении заднего конца "черновой" трубы:

$$\mu^{н.ст}_{срУЗК\,6,7} = \frac{\left(D_{н.ст.5} - 1.03 \cdot S_{н.ст.5}\right) \cdot 1.03 \cdot S_{н.ст.5}}{\left(D_{срУЗК} - S^{н.ст}_{срУЗК}\right) \cdot S^{н.ст}_{срУЗК}}. \qquad (38)$$

Для определения скорости перемещения верхнего валка 6 и 7 клетей непрерывного стана необходимо определить время прокатки участка заднего конца "черновой" трубы, подлежащего утонению в этих клетях.

Примем, как и для утонения переднего конца "черновой" трубы, что максимальный $\mu^{н.ст}_{\max УЗК\,6,7}$ и средний $\mu^{н.ст}_{срУЗК\,6,7}$ коэффициенты вытяжки распределяется между 6 и 7 клетями непрерывного стана следующим образом:

$$\begin{aligned}
\mu^{н.ст}_{\max УЗК\,6} &= \sqrt[3]{\mu^{н.ст}_{\max УЗК\,6,7}}^{\,2}; \\
\mu^{н.ст}_{\max УЗК\,7} &= \sqrt[3]{\mu^{н.ст}_{\max УЗК\,6,7}}; \\
\mu^{н.ст}_{срУЗК\,6} &= \sqrt[3]{\mu^{н.ст}_{срУЗК\,6,7}}^{\,2}; \\
\mu^{н.ст}_{срУЗК\,7} &= \sqrt[3]{\mu^{н.ст}_{срУЗК\,6,7}}.
\end{aligned} \qquad (39)$$

Тогда минимальная скорость входа металла в 6-ую клеть непрерывного стана:

$$V^{\min}_{вхУЗК\,6} = \frac{V_{вых\,6} \cdot \dfrac{D_{кат6}}{D_{кат6} - H_{УЗК}}}{\mu^{н.ст}_{\max УЗК\,6}}. \qquad (40)$$

Вытяжка в 6-ой клети к моменту окончания утонения заднего конца "черновой" трубы в ней:

$$\mu^{const}_{6} = \frac{\left(D_{н.ст5} - 1.03 \cdot S_{н.ст5}\right) \cdot 1.03 \cdot S_{н.ст5}}{\left(D_{н.ст6} - 1.03 \cdot S_{н.ст6}\right) \cdot 1.03 \cdot S_{н.ст6}}. \qquad (41)$$

Скорость входа металла при этом будет:

$$V_{вхУЗК\,6}^{const} = \frac{V_{вых\,6}}{\mu_6^{const}}. \qquad (42)$$

Средняя скорость прокатки заднего утоненного (подготовленного) конца "черновой" трубы будет:

$$V_{вхУЗК\,6}^{ср} = \frac{V_{вхУЗК\,6}^{мин} + V_{вхУЗК\,6}^{const}}{2}. \qquad (43)$$

Длина заднего утоненного (подготовленного) конца "черновой" трубы после 6-ой клети будет:

$$L_{УЗК\,6}^{н.ст.} = \frac{L_{УЗК}^{н.ст}}{\mu_{срУЗК\,7}^{н.ст}}. \qquad (44)$$

Время перемещения (сведения) верхнего валка 6-ой клети при утонении (подготовке) заднего конца "черновой" трубы будет:

$$t_{УЗК\,6} = \frac{L_{УЗК\,6}^{н.ст}}{V_{вхУЗК\,6}^{ср}}. \qquad (45)$$

Искомая скорость перемещения верхнего валка 6-ой клети непрерывного стана при утонении (подготовке) заднего конца "черновой" трубы будет:

$$v_{УЗК\,6} = \frac{H_{УЗК}}{t_{УЗК\,6}}. \qquad (46)$$

По аналогичным зависимостям можно определить параметры настройки системы подготовки заднего конца черновой трубы в 7-ой клети непрерывного стана.

Выводы

Для получения заднего конца "черновой" трубы требуемого профиля получили следующие технологические параметры:

- величину сближения (сведения при прокатке) валков 6-ой и 7-ой клетей $H_{6\,УЗК}$ и $H_{7\,УЗК} = H_{УЗК}$, мм;

- время с момента начала подготовки заднего конца "черновой" трубы, в течение которого следует сводить валки 6-ой и 7-ой клетей $t_{УЗК6}$ и $t_{УЗК7}$, с;

- скорость сведения верхних валков 6-ой и 7-ой клетей $v_{УЗК6}$ и $v_{УЗК7}$, мм/с.

Корректировать частоту вращения валков 6-ой и 7-ой клетей при утонении стенки на заднем конце "черновой" трубы не требуется, так как этот участок трубы прокатывается при утонении вначале только в 6-ой, а затем только в 7-ой клети, т.е. не в режиме непрерывной прокатки.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Редукционные* станы / В.П. Анисифоров, Л.С. Зельдович, В.Д. Курганов, и др. – М.: Металлургия, 1971. – 256 с.

УДК 621.774.3

Панюшкин Е.Н., Кондратьев С.В., Лозовой В.И.,
Скоромный С.А., Панюшкин Н.Е., Олейник В.С., Бойко И.П.

ВЛИЯНИЕ РАСКРОЯ ИСХОДНОЙ ТРУБНОЙ ЗАГОТОВКИ НА ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ РАБОТЫ ТПА 30-102 ООО «ИНТЕПАЙП НИКО ТЬЮБ»

В статье выполнен анализ вариантов раскроя трубных заготовок для различных вариантов оптимизации технологического процесса производства труб на ТПА 30-102. Этот анализ базируется на разработанном пакете программ расчета параметров технологического процесса.

У статті виконаний аналіз варіантів розкрою трубних заготовок для різних варіантів оптимізації технологічного процесу виробництва труб на ТПА 30-102. Цей аналіз базується на розробленому пакеті програм розрахунку параметрів технологічного процесу.

In the article the variants of cutting analysis out of pipe purveyances is executed for the different variants of pipes production technological process optimization on TPA 30-102. This analysis is based on the developed package of software for technological process parameters calculation.

Введение

В настоящее время раскрой исходных трубных заготовок, поступающих на ТПА 30-102 с металлургических заводов, осуществляется в соответствии с требуемыми длинами заказанных труб. При этом, не учитываются технико-экономические показатели работы всего агрегата в целом, такие как потери металла, связанные с обрезью заготовок и труб, в том числе, в потоке, а также производительность агрегата, влияющая на величину себестоимости продукции, и пр.

Проблема. Следует отметить, что анализ указанных показателей по всему сортаменту выпускаемых труб весьма затруднителен из-за необходимости обработки большого объема информации и отсутствия соответствующего программного обеспечения.

В связи с этим был проведен сравнительный анализ технико-экономических показателей работы ТПА 30-102, включающий его производительность, расходы металла при возможной реализации следующих критериев оптимизации производства:

- безотходный раскрой исходной трубной заготовки (I вариант);
- достижение максимальной производительности трубопрокатного агрегата (II вариант);
- обеспечение прокатки труб только мерной длины (III вариант).

© ПАНЮШКИН Е.Н., КОНДРАТЬЕВ С.В., ЛОЗОВОЙ В.И., СКОРОМНЫЙ С.А., ПАНЮШКИН Н.Е., ОЛЕЙНИК В.С., БОЙКО И.П, 2008

Результаты исследований. С указанной целью была разработана методика и программа расчета производительности трубопрокатного агрегата и расхода металла по всему сортаменту прокатываемых труб ТПА 30-102. Данная методика базируется на расчетах деформационно-скоростных и настроечных параметров станов агрегата, длин утолщенных концов редуцированных труб и технологической обрези в потоке, приведенных к длинам трубной заготовки, а также существующих вариантах раскроя последней.

Длины утолщенных концов редуцированных труб определяли по методике Г.И. Гуляева и В.П. Рукобратского [1].

$$L_{УПК} = 5{,}2 \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot L_м \cdot Z_{общ}; \quad (1)$$

$$L_{УЗК} = 3{,}7 \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot L_м \cdot \left(2{,}89 \cdot Z_{общ} - 1{,}68 \cdot Z^2_{общ}\right). \quad (2)$$

При этом, величину K_2 определяли по вышеуказанной методике, исходя из соотношения:

$$K_2 = 0{,}07 \cdot m_{общ} - 0{,}0004 \cdot m^2_{общ} - 1{,}24 \quad (3)$$

Величину же K_1 рассчитываем по эмпирическим выражениям, базирующимся на статистической обработке результатов многочисленных исследований точности труб в условиях ТПА 30-102.

Для переднего утолщенного конца:

$$K_1 = K_{УПК} = 0{,}053 \cdot \left\{ \left(2{,}5 + 0{,}12 \cdot m_{общ}\right) \cdot \left[1 - \left(\frac{m_{общ}}{100} \right)^{Z_{общ}} \cdot K_{ср} \right] \right\} + 0{,}64 \cdot \quad (4)$$

Для заднего утолщенного конца:

$$K_1 = K_{УЗК} = 0{,}053 \cdot \left\{ 5{,}5 + \left(2{,}5 + 0{,}12 \cdot m_{общ}\right) \cdot \left[1 - \left(\frac{m_{общ}}{100} \right)^{Z_{общ}} \cdot K_{ср} \right] \right\} + 0{,}64 \cdot \quad (5)$$

В соотношениях (4) и (5):

$$K_{ср} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{S_{н.ст}}{D_{н.ст}} + \frac{S_{тр}}{D_{тр}} \right) \quad (6)$$

В формулах 1...6 учитываются следующие основные конструктивные особенности редукционного стана и технологические параметры:

$L_м$ – межклетевое расстояние редукционного стана, мм;

$Z_{общ}$ – величина коэффициента общего пластического натяжения в стане;

$m_{общ}$ – общее обжатие диаметра трубы от входа до выхода из стана, %;

$D_{н.ст}$ и $S_{н.ст}$ – наружный диаметр и толщина стенки "черновой" трубы после непрерывного стана;

 ISSN 1991-7848

$D_{тр}$ и $S_{тр}$ – наружный диаметр и толщина стенки труб после редуцирования.

Для определения величины коэффициента общего пластического натяжения – параметра, оказывающего определяющее влияние на длины утолщенных концов труб, применялась известная методика [1], но с учетом конкретной калибровки валков и особенностей использования дифференциально-группового привода редукционного стана ТПА 30-102 [2].

Следует отметить, что указанный выше сравнительный анализ потребовал введения в расчеты ряда условий и ограничений, обусловленных его привязкой к конкретному трубопрокатному агрегату.

Так, например, учитывался тот факт, что в настоящее время нагрев раскроенных трубных заготовок осуществляется в одной кольцевой печи, и именно она определяет возможный темп прокатки (до 4 шт/мин) в условиях ТПА 30-102.

В качестве условия, обеспечивающего достижение максимальной производительности агрегата, принималось построение технологического процесса для получения "черновых" труб после непрерывного стана максимально возможной длины (до 30,0 м). При этом, в качестве ограничительных факторов служили предельная длина гильзы (7500 мм) и деформационные возможности непрерывного стана с учетом длины применяемых цилиндрических оправок (19500 мм). В свою очередь, деформационные возможности непрерывного стана оценивались с помощью разработанных программ расчета распределения вытяжек по клетям стана в зависимости от калибровки валков и настройки рабочих клетей, а также параметров выдвижения оправки из гильзы перед прокаткой, режимов их задачи в первую клеть непрерывного стана.

Величину же расходного коэффициента металла, учитывающего угар металла и технологическую обрезь в потоке, определяем по формуле:

$$РКМ = \frac{Q_{заг}}{Q_{заг} \cdot K_{уг} - Q_{см} - Q_{УПК} - Q_{УЗК} - Q_{лн} - Q_{ост}} \ , \qquad (7)$$

где: $Q_{заг}$ - объем задаваемой в производство трубной заготовки;

$K_{уг}$ - коэффициент угара металла в кольцевой печи. Принимаем $K_{уг} = 0{,}98$;

$Q_{см}$ - объем металла, соответствующий обрези смятого заднего конца черновых труб при извлечении оправок;

$Q_{УПК}$ и $Q_{УЗК}$ - объем металла утолщенных переднего и заднего концов редуцированных труб;

$Q_{лн}$ - объем металла, соответствующий обрези смятых концов редуцированных труб, при их порезке летучими ножницами;

$Q_{ост}$ - объем металла немерного остатка редуцированной трубы.

При определении величины немерного остатка готовой трубы в качестве критерия мерности использовалась длина труб 6000^{+100}мм.

В формулу 7 не входит объем металла остатков трубной заготовки, получаемые при её раскрое. Это связано с тем, что зачастую, особенно при раскрое заготовки с целью получения максимальной производительности агрегата (II вариант) длины остатков нередко превышают 2000 мм, а, следовательно, могут быть использованы для прокатки труб других типоразмеров. Определить такое использование остатков заготовки возможно лишь рассматривая конкретный набор заказов, а не при общем анализе показателей работы ТПА 30-102.

На основании вышеизложенных соображений был выполнен сравнительный анализ влияния различных критериев оптимизации производства труб, прокатываемых на ТПА 30-102, на величины производительности агрегата и технологического расходного коэффициента металла.

Проведенные расчеты в рамках существующего сортамента позволили сделать следующие выводы (табл. 1).

Таблица 1

Пример влияния критериев оптимизации производства на показатели работы ТПА 30-102 при изготовлении труб различного сортамента

№ п/п	Размер труб, мм	Критерии оптимизации					
		Безотходный раскрой заготовки		Максимальная производительность		Прокатка мерных труб	
		Производительность агрегата, т/час	РКМ	Производительность агрегата, т/час	РКМ	Производительность агрегата, т/час	РКМ
1	42×4,0	71,45	1,124	72,41	1,136	69,93	1,101
2	45×4,0	71,45	1,115	72,41	1,127	70,51	1,101
3	50×4,0	66,61	1,156	70,96	1,141	68,50	1,106
4	51×4,0	58,13	1,184	65,15	1,122	64,18	1,107
5	57×4,0	66,61	1,114	69,51	1,156	66,17	1,107
6	60×4,0	66,61	1,165	68,06	1,180	63,31	1,110
7	63,5×4,0	66,61	1,110	66,61	1,109	66,27	1,104
8	70×4,0	58,13	1,109	65,15	1,105	64,89	1,101
9	73×4,0	58,13	1,217	63,69	1,166	59,73	1,103
10	76×4,0	58,13	1,181	63,69	1,132	61,52	1,098

 ISSN 1991-7848

Производительность трубопрокатного агрегата, очевидно, максимальна для II варианта оптимизации производства и средняя её величина превышает этот показатель для I и III вариантов на 5,56% и 3,45% соответственно.

Значительный интерес представляют колебания значений расходного коэффициента металла. Это связано с тем, что в структуре себестоимости труб превалирующее значение имеет стоимость заданного металла на единицу продукции.

Сравнительный анализ показал, что наименьшие значения расходного коэффициента металла соответствует варианту прокатки только мерных труб (III вариант).

В то время, как по I варианту средний РКМ превышает указанный на 4%, а по II варианту – на 3%.

Таким образом, среди всех рассмотренных вариантов оптимизации производства, наиболее предпочтительна организация технологии производства, включая раскрой трубной заготовки, обеспечивающая производство труб мерной длины.

Выводы

Следует отметить, что проведенный анализ показателей работы ТПА 30-102 носит общий характер, и не учитывает наличия конкретных заказов, а также стоимостные характеристики анализируемых параметров. Учет этих обстоятельств в разработанных методиках и программах расчета может потребоваться для более углубленного анализа и принятия обоснованных решений при планировании производства в условиях ТПА 30-102.

ЛИТЕРАТУРА

1. Технология непрерывной безоправочной прокатки труб / Г.И. Гуляев, П.Н. Ившин, И.Н. Ерохин и др. – М.: Металлургия, 1975. – 264 с.
2. Панюшкин Н.Е. Развитие методов расчета деформационно-скоростных режимов горячего редуцирования с натяжением труб повышенной точности: Дис. канд. техн. наук. – Днепропетровск, 2007. – 144 с.

УДК 621.774.3

Панюшкин Е.Н., Скоромный С.А., Моргулис В.П.,
Загребенюк А.М., Кондратьев С.В., Лозовой В.И.,
Олейник В.С., Бойко И.П., Луценко О.В.

РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО СОПРОВОЖДЕНИЯ ПРОКАТКИ ТРУБ В УСЛОВИЯХ ТПА 30-102 ООО "ИНТЕРПАЙП НИКО ТЬЮБ"

В статье изложен подход при создании информационной системы для ТПА 30-102 и её возможности при применении. В основу разработанной системы заложена идентификация и слежение за прохождением каждой трубной заготовки по технологической цепи агрегата.

У статті викладений підхід при створенні інформаційної системи для ТПА 30-102 і її можливості при застосуванні. В основу розробленої системи закладені ідентифікація й спостереження за проходженням кожної трубної заготовки по технологічному ланцюзі агрегату.

In the article approach is expounded at creation of the information system for TPA 30-102 and its possibilities at application. The developed system is based on authentication and track is stopped up after passing of every pipe purveyance on the technological chain of aggregate.

Введение

Проблема. Информационная система технологического сопровождения прокатки труб является первым этапом в создании автоматической системы управления технологическим процессом производства труб на ТПА 30-102. Она может использоваться как часть общезаводской информационной системы.

Информационная система в режиме реального времени может контролировать и сохранять в архиве:

- расход металла как по каждому из этапов производства горячекатаных труб, так и в целом по агрегату, что позволит выявить основные причины сверхнормативных потерь металла;

- технологические параметры работы станов трубопрокатного агрегата с привязкой их к каждой прокатываемой трубе и времени её обработки;

- геометрические характеристики прокатываемых труб на каждом этапе их производства.

Такая информация позволит осуществлять анализ технологических параметров и их оперативную корректировку.

© ПАНЮШКИН Е.Н., СКОРОМНЫЙ С.А., МОРГУЛИС В.П., ЗАГРЕБЕНЮК А.М., КОНДРАТЬЕВ С.В., ЛОЗОВОЙ В.И., ОЛЕЙНИК В.С., БОЙКО И.П., ЛУЦЕНКО О.В., 2008

В дальнейшем эта система может быть использована как источник сигналов управления в АСУ ТП.

Результаты исследований. Структурно разработанная информационная система состоит из основной информационной системы (ОИС) и вспомогательных систем (ВС).

К вспомогательным системам относятся небольшие системы, решающие отдельные локальные технологические задачи. Это вспомогательные системы кольцевой печи, прошивного и непрерывного станов, индукционных печей промежуточного подогрева металла, калибровочного и редукционного станов. Каждая из перечисленных ВС обеспечивает контроль и архивирование параметров работы отдельной структурной технологической единицы. Так, ВС кольцевой печи регистрирует текущий расход газа, температуры печи по зонам, температуру каждой нагретой трубной заготовки.

ВС прошивного стана может обеспечить регистрацию температуры прошивки, вес гильзы в горячем состоянии, её длину и диаметр, расчетным путем определять среднюю толщину стенки гильзы. Кроме того, возможно отслеживать нагрузки на главный привод прошивного стана, частоту вращения его валков, машинное время и такт прошивки.

Вспомогательной системой непрерывного стана должна регистрироваться информация о температуре прокатки, длине и диаметре черновой трубы, величине выдвижения оправки из гильзы, частоте вращения валков, нагрузках на главные приводы и зазорах между бочками валков по клетям стана, расчетным путем определяется средняя толщина стенки черновой трубы и коэффициент вытяжки в стане.

Аналогичные задачи должны решаться другими вспомогательными информационными системами.

Особенностью разработанной информационной системы является организация идентификации и слежения за прохождением каждой трубной заготовкой всех этапов производства. Эта задача решается путем создания отдельной локальной системы, в структуру которой входят основные счетчики (ОС) и датчики наличия металла, устанавливаемые на каждой единице основного технологического оборудования агрегата, а также вспомогательные счетчики, располагаемые в местах возможного удаления гильз (труб) из технологического потока.

Счетчики, как основные, так и вспомогательные должны быть идентичны и срабатывать только при наличии двух сигналов: либо

сигналов от предыдущих счетчиков, либо одного сигнала от предыдущих счетчиков и второго от датчика наличия металла.

Локальная система идентификации присваивает каждой заготовке индивидуальный номер, который подтверждается после каждой технологической операции превращения указанной заготовки в готовую трубу. К этому номеру привязываются все технологические параметры, зарегистрированные информационной системой при прокатке данной трубной заготовки.

Описанная выше информационная система была реализована в виде рабочего проекта охватывающего все основные объекты обработки металла от участка загрузки трубной заготовки в кольцевую печь до оправкоизвлекателей включительно.

При разработке рабочего проекта учитывалась возможность расширения объема регистрируемой информации как основной, так и вспомогательными системами.

Так, информационные объекты вспомогательных систем станов агрегата могут быть дополнены информацией о параметрах первоначальной настройки станов и её изменении при осуществлении технологического процесса.

Основная информационная система позволяет увеличить число вспомогательных систем, входящих в её состав.

Выводы

Рабочий проект информационной системы, предполагает учет особенностей технологии и оборудования ТПА 30-102 ООО "Интерпайп Нико Тьюб". Однако, подходы к решению информационных задач и структура системы достаточно универсальны, а, следовательно, могут быть использованы при создании таких систем на трубопрокатных агрегатах для производства горячекатаных бесшовных труб.

 ISSN 1991-7848

УДК 621.774.6

А.А.Погребной, В.В.Бояркин, В.А. Постный

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПОЛЫХ ДОРНОВ ПИЛЬГЕРСТАНА

Прокатка труб большого диаметра на пильгерных станах характеризуется большими динамическими нагрузками. Целесообразно применение полых дорнов с целью снижения их массы и более равномерного охлаждения. Представленная методика позволяет определять геометрические размеры поперечного сечения полого дорна.

Прокатка труб великого діаметру на пільгерних станах характеризується великими дінамічними навантаженнями. Доцільно використання порожнистих дорнів з метою зменшення їх ваги та більш рівномірного охолодження. Методика, що пропонується, дозволяє визначати геометричні розміри поперечного переріза порожнистого дорна.

Rolling of big diameter tubes on pilger mills it is characterized by the big dynamic loads. Application hollow mandrels is expedient with the purpose of lowering their mass and more uniform refrigeration. The introduced technique allows to define the geometrical sizes of hollow mandrels cross-section.

Введение

Оправки пилигримового стана (дорны) работают в очень тяжёлых условиях. Это связано с резко переменными циклическими температурными колебаниями, которые претерпевают дорны при прокатке. Вначале нового типоразмера труб валки и дорн имеют температуру около 20°С и постепенно разогреваются от периферии к центру (рис. 1).

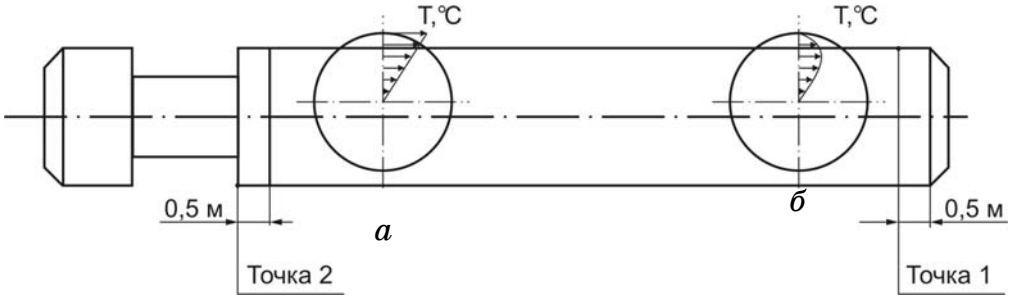


Рисунок 1 – Градиент температуры дорнапосле прокатки (*а*) и охлаждения (*б*)

Поле прокатки дорн возвращается на повторный цикл для охлаждения в ванне с водой и нанесения смазки. При этом дорн охлаждается, но не равномерно, а только на периферии, и температура на поверхности снижается. В дальнейшем снова происходит повышение температуры от тепла горячей гильзы, тепла, полученного в результате деформации и переноса тепла от центра к поверхности (рис. 1*б*).

© ПОГРЕБНОЙ А.А, БОЯРКИН В.В., ПОСТНЫЙ В.А., 2008

Эти колебания температур очень сложно определить количественно практически, т.е. экспериментальным путем, и ещё сложнее теоретическим. Однако можно предположить, что колебания температур в поверхностном слое значительны, причём эти колебания происходят в относительно короткое время (10-15 мин.). Циклическое нагревание и охлаждение приводят к циклическому изменению объёма поверхностного слоя дорна под действием известного явления – теплового расширения материала (металла). Колебания размеров поверхностного слоя, при постоянном объёме внутренних слоев, приводит к появлению наружных и поперечных микротрещин, которые развиваются в глубину. Нарушение поверхностного слоя дорнов приводит к появлению дефектов на внутренней поверхности трубы, что приводит к снижению их качества.

На повышение стойкости поверхности дорнов существенное влияние оказывает применение смазки. Ранее, при горячей прокатке, использовались, как правило, органические смазки, например, графит. В годы второй мировой войны на Урале иногда применяли экзотические смазочные материалы: просоленные животные жиры, например, свиное сало, берёзовые веники и др. при прокатке блюмов и слябов. В настоящее время, при горячей прокатке труб, для смазки длинных оправок (непрерывный стан, пилигримовый стан) используют минеральные смазки: поваренную соль и триполифосфат натрия. Применение их следующее: соль вбрасывают в гильзу, водный раствор триполифосфата наносят на горячую оправку (свыше 100 °С). Вода при этом испаряется, а в виде тонкой плёнки белого цвета остаётся на поверхности оправки (дорна). Триполифосфат натрия, помимо смазочного эффекта, т.е. уменьшения коэффициента трения, оказывает также теплоизоляционный эффект. Однако, качественное нанесение триполифосфата натрия на дорн, в условиях внестановой зарядки, в цехе №4 имеет существенные недостатки. Технология охлаждения и нанесения смазки следующая: смазка (триполифосфат натрия) наносится на дорн при температуре ~100 °С, т.к. поверхностный слой металла дорна примерно равен температуре кипения воды. Почти 35 летний опыт использования триполифосфата натрия в качестве смазки на ТПА 30-102 на Никопольском трубопрокатном заводе показал, что оптимальная температура нанесения смазки на длинную оправку непрерывного стана находится в интервале 140…180 °С. При этом вода достаточно быстро испаряется, а триполифосфат натрия, в виде белой плёнки, плотно схватывается с металлом оправки.

Кроме того, дорн находится в гильзе в течение 2-3 минут до начала прокатки. Всё это время дорн лежит в гильзе одной стороной, а

 ISSN 1991-7848

смазка частично стекает с дорна, что не способствует нормальному процессу прокатки.

Охлаждение цельных дорнов происходит по диаметру от периферии к центру, что характеризуется высоким градиентом (перепадом) температуры от наружной поверхности к центру и, как говорилось выше, при цикличном прогреве и охлаждении водой в ванне приводит к появлению трещин на поверхности дорна. Уменьшить перепад температур можно благодаря применению полых дорнов. Поэтому возникает задача по определению толщины стенки полого дорна, при которой отсутствует потеря поперечной устойчивости.

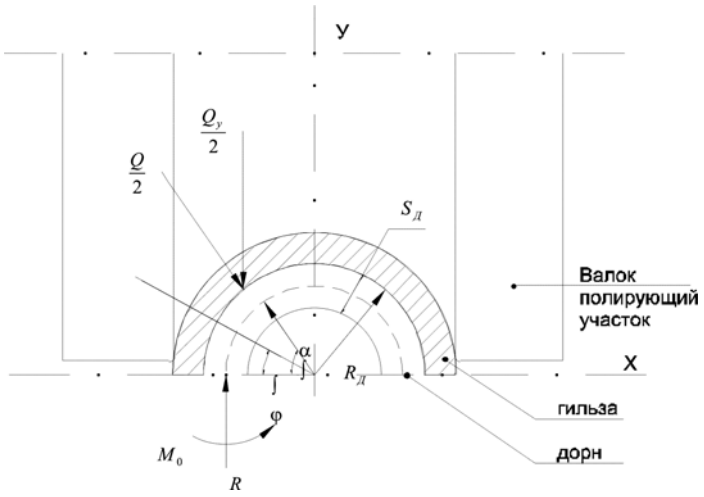


Рисунок 2 – Схема нагружения дорна при прокатке

Для определения толщины стенки полого дорна при известном максимальном усилии давления металла с целью отсутствия потери поперечной устойчивости воспользуемся известной задачей А. Феппла для расчёта трубы на сжатие. В связи с симметричностью сечения дорна и действующих на него сил, достаточно рассмотреть одну четвёртую её часть (рис. 2). Действие внутренних сил отброшенной части можно заменить моментом Мо и силой R.

Изгибающий момент в любом сечении рассматриваемой части трубы, определяемой углом φ, равен сумме моментов всех действующих на неё внешних сил, лежащих слева от заданного сечения и приложенных к трубе.

Таким образом, уравнение моментов будет иметь вид:

Для $\varphi<\alpha$

$$M\varphi=Mo + M_1, \qquad (1)$$

где M_1 – момент от действия силы Q.

$$R = S\ Q\ \cos\alpha \qquad (2)$$

и определяется из уравнения равновесия сил на оси Y.

Уравнение моментов для $\varphi<\alpha$ запишется в виде:

$$M\varphi=M_o + Q/2\ \cos\alpha(r - r\cos\varphi) \quad (3)$$

А. Феппл [1] доказал, что в случае симметричности рассматриваемого сечения, интеграл упругого приращения элементарного угла равен 0, т.е. $\int_0^{\pi/2}\Delta d\varphi = 0$.

Принимая во внимание, что $\Delta d\varphi = M\varphi r d\varphi/EI$:

$$\int_0^{\varphi}\frac{\left[M_0 + Q/2\cdot\cos(\alpha)\cdot(r - r\cdot\cos(\varphi)\right]}{E\cdot I}\cdot d\varphi = 0 \quad (4)$$

Решение полученного уравнения позволит нам найти искомое усилие, в зависимости от величины момента M_0.

$$Q=\frac{2\cdot M_0}{r\cdot\cos(\alpha)\cdot(\sin\varphi/\varphi-1)}. \quad (5)$$

Поперечное сечение дорна, испытывающее деформацию, образует четырёхугольник с моментом сопротивления.

$$W=\frac{l_д\cdot S_д^2}{\sigma_t}, \quad (6)$$

где $l_д$ – длина контакта дорна и металла; $S_д$ – толщина плёнки полого дорна.

Имея в виду, что допускаемое напряжение на изгиб $[\sigma_{изг}]$ равно отношению изгибающего момента M_0 к моменту сопротивления W, решая совместно (5) и (6), получим максимальное усилие допустимого давления на дорн. Вследствие симметричности рассматриваемой схемы, считая опасными сечениями соответствующим углам $< \varphi = 0^\circ$, 45°, 90°, необходимо принимать $< \varphi = \pi/4$.

Значение допустимого напряжения на изгиб можно принять равным $0{,}7\sigma_т$. Влияние внешних зон на величину контактных напряжений учитывается коэффициентом n''_σ, определяемым по эмпирической формуле [2]:

$$n''_\sigma = 1+\sqrt{\frac{S_д\cdot D_д}{l_д}} \quad (7)$$

по аналогии с редуцированием при малых обжатиях.

Учитывая вышеизложенное, максимально допустимые усилия Q, при котором наступает потеря поперечной устойчивости, выразится уравнением:

$$Q = \frac{3{,}5 \cdot \sigma_t \cdot n''_\sigma \cdot S_д^2 \cdot l_д}{r}. \qquad (8)$$

Толщину стенки полого дорна можно определить путём совместного решения (7) и (8) уравнений, принимая во внимание, что

$$r = R_д - \frac{S_д}{2}, \text{ а } l_д = R_i \cdot \sin(\theta_{3x}),$$

где $R_д$ – радиус наружного диаметра дорна; R_i – радиус балки по вершине калибра в начале полирующего участка; θ_{3x} – угол захвата в начале полирующего участка, равный 14є...20є, в зависимости от толщины стенки прокатываемой трубы.

Из уравнения (8)

$$n''_\sigma = \frac{Q_r}{3{,}5 \cdot \sigma_t \cdot S_д^2 \cdot l_д}; \qquad (9)$$

Приравнивая правые части уравнений (7) и (9), получим:

$$\frac{l_д + \sqrt{2 \cdot l_д \cdot R_д}}{l_д} = \frac{Q \cdot r}{3{,}5 \cdot \sigma_т \cdot S_д^2 \cdot l_д} \qquad (10)$$

Аналитически уравнение (10) решается довольно сложно (наличие радикалов), относительно толщины стенки дорна, однако, легко решается относительно максимального усилия Q.

$$Q = \frac{\left(l_д + \sqrt{2 \cdot S_д \cdot R_д}\right) \cdot 3{,}5 \cdot \delta_т \cdot S_д^2}{r} \qquad (11)$$

Уравнение (11) легко программируется, т.к. алгоритм уравнения (11) несложен и, учитывая, что параметры кроме $S_д$ известны, можно использовать метод последовательной подстановки (итерации).

Использование представленной методики позволяет определить рациональные размеры полого дорна для горячей пильгерной прокатки труб больших размеров, что ведет к снижению динамических нагрузок в клети и увеличению срока службы деталей стана.

ЛИТЕРАТУРА

1. Феппл А. Теоретическая механика. Том. III. Сопротивление металлов. ОНТИ, НК ТП. – М., 1937.
2. Редукционные станы / В.П. Анисифиров. Л.С. Зельдович и др. – М.: Металлургия, 1971.

УДК 621. 774.32

Рахманов С.Р., Вышинский В.Т.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ СТЕРЖНЯ МЕХАНИЗМА УДЕРЖАНИЯ ОПРАВКИ СТАНОВ ВИНТОВОЙ ПРОКАТКИ ТРУБ

Решена задача о параметрических колебаниях стержня механизма удержания оправки стана винтовой прокатки труб. Получена система дифференциальных уравнений колебаний стержня в параметрической форме. Определены условия динамической устойчивости стержня оправки по диаграмме Айнса-Стретта при вынужденных колебаниях системы.

Розв’язана задача щодо параметричних коливань стрижня механізму утримання оправки стана гвинтової прокатки труб. Одержана система діференційних рівнянь коливань стрижню у параметричній формі. Визначені умови динамічної тривалості стрижню оправки за діаграмою Айнса-Стретта при примусових коливаннях системи.

The problem on parametric oscillations of the stem of the fixing mandrel mechanism in the screw–rolling tube mills had been solved. A system of differential equations of the stem oscillations had been obtained in parametric form. Conditions of dynamic stability of the mandrel stem had been determined according to Eins–Strett diagram at the forced oscillations of the system.

Технологический процесс производства бесшовных горячекатаных труб на станах винтовой прокатки трубопрокатного агрегата предусматривает прошивку отверстий в сплошной трубной заготовке на прошивном стане, с последующей раскаткой ее на раскатном стане на оправке, которая удерживается посредством стержневой системы.

Интенсификация технологического процесса на станах винтовой прокатки и повышение качества производимых бесшовных труб обусловлена особенностями поведения гибких элементов (стержней) механизма удержания оправки. Это вызывает необходимость глубокого изучения возникающих при этом сложных динамических процессов стержня механизма удержания оправки [1].

Установлено, что колебания системы «гильза (труба)-оправка-стержень» отрицательно влияет на работу оборудования, и значительно ухудшают процесс прокатки труб. Это приводит к получению гильз повышенной разностенности и существенному снижению долговечности оборудования выходной стороны прошивных и раскатных станов трубопрокатного агрегата (рис.1) [2].

Действия больших статических и динамических нагрузок, воспринимаемых непосредственно через оправку гибким стержнем, в ря-

 ISSN 1991-7848

де случаев может привести к неожиданной потере его устойчивости (рис.2)[3].

Повышение динамической устойчивости стержневой системы требует исключение определенных условий, обуславливающих возникновение различного рода нежелательных параметрических колебательных явлений. Это может быть достигнуто на основе детального изучения динамических особенностей рассматриваемой сложной механической системы.

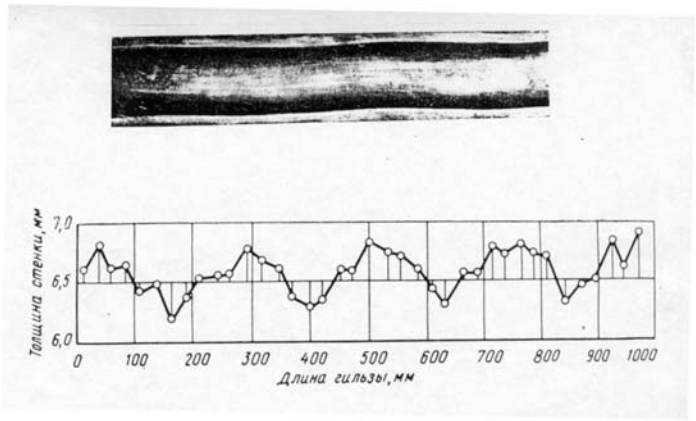


Рисунок 1- Картина винтовой разностенности гильзы после прошивного стана трубопрокатного агрегата ТПА-140 (труба ш 97х6, сталь 20)

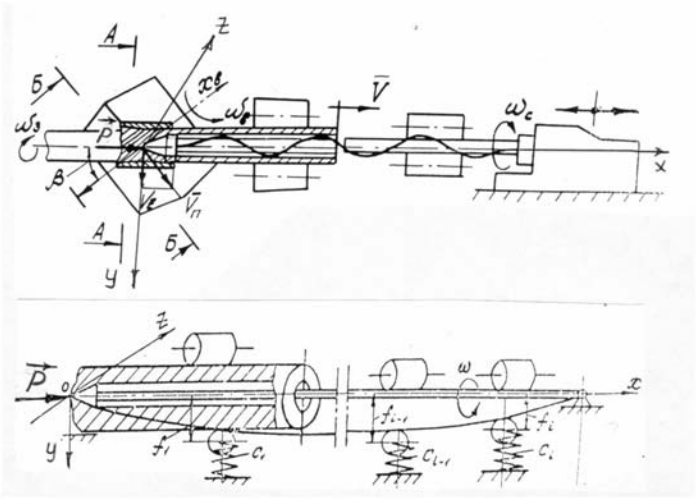


Рисунок 2 - Особенности процесса прошивки и поведения стержня оправки стана винтовой прокатки труб

Данному вопросу посвящены многочисленные экспериментальные и теоретические работы [4, 5], где дается обширный анализ сил действующих на стержневую систему и, указаны возможные варианты колебательных процессов механической системы.

В отличие от известных решений [6,7] в настоящей работе приведены исследования виброактивности механической системы с учетом нестационарного взаимодействия стержневой системы с прокатываемой или прошиваемой трубой.

Расчетная схема, составленная с учетом технологических особенностей производства бесшовных труб, отражает воздействие усилия прошивки (прокатки) и распределенной нагрузки от перемещающейся вдоль стержня со скоростью $\vec{\upsilon}$ трубы (рис.3).

Представленная расчетная схема наиболее близка к реальному технологическому процессу. Поэтому, динамические явления при прокатке бесшовных труб глубже отражаются с учетом особенностей поведения стержня на станах винтовой прокатки трубопрокатного агрегата.

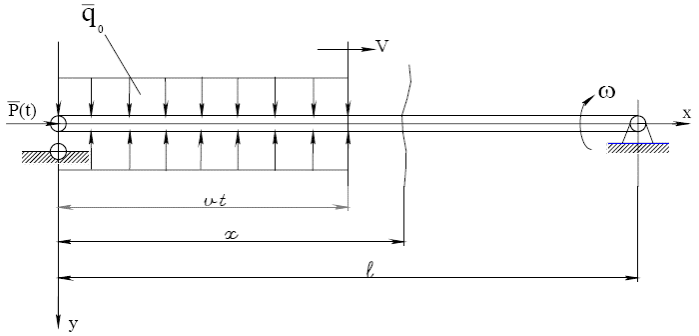


Рисунок 3 - Расчетная схема стержня оправки стана винтовой прокатки труб

Колебания стержня, рассматриваемого механизма удержания оправки в осевом направлении, согласно принятой расчетной схеме (рис. 3), описываются дифференциальным уравнением

$$EI\frac{\partial^4 y}{\partial x^4}+m_0\frac{\partial^2 y}{\partial t^2}+P(t)\frac{\partial^2 y}{\partial x^2}=\begin{cases}q(x,t),\ 0\le x\le \upsilon t;\\ 0,\ \upsilon t\langle x\le \ell,\end{cases} \qquad (1)$$

где $y(x,t)$ - динамический прогиб стрежня механизма удержания оправки; EI - изгибная жесткость стержня; $q(x,t)$ - интенсивность нагружения стержня трубопрокатного агрегата прокатываемой трубой; m_0 - погонная масса стержневой системы механизма удержания оправки; υ - скорость прошивки или раскати трубы (гильзы).

Уравнение (1) составлено с учетом инерции стержневой системы, периодически изменяющегося осевого усилия прошивки и интенсивности воздействия прокатываемой трубы.

Многочисленные экспериментальные исследования осевого усилия, возникающего при прошивке и действующего на стержневую

 ISSN 1991-7848

систему, дают необходимое и достаточное основание, что в первом приближении можно принять условия, описанные в работе [5].

$$P(t) = P_0 + P_1 \cdot \cos\left(\omega \cdot t\right), \tag{2}$$

где P_0 - статическая составляющая усилия прокатки трубы; P_1 и ω - соответственно динамическая составляющая усилия прокатки трубы и частота ее изменения.

Необходимо отметить, что при некоторых допущениях, частота изменения осевого составляющего усилия в процессе прошивки трубы без учета скольжения гильзы в очаге деформации, приблизительно, совпадает с частотой вращения стержня оправки.

Дифференциальное уравнение (1) с учетом (2) перепишется в виде

$$EI\frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + m_0\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + \left(P_0 + P_1\cos\left(\omega t\right)\right)\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \begin{cases} q(x,t), 0 \le x \le \upsilon t; \\ 0, \upsilon t \langle x \le \ell, \end{cases} \tag{3}$$

Решение дифференциального уравнения (3) ищем в виде ряда по фундаментальным функциям задачи

$$y(x,t) = \sum_{k=1}^{\infty} T_k(t)\cdot\sin\left(\frac{k\cdot\pi\cdot x}{\ell}\right), \tag{4}$$

где $T_k(t)$ - искомая функция времени, подлежащая определению в ходе решения задачи; $\sin\left(\frac{k\cdot\pi\cdot x}{\ell}\right)$ - фундаментальная функция колебаний стержня оправки, шарнирно закрепленного по концам; ℓ - длина стержневой системы механизма удержания оправки.

При решении дифференциального уравнения вынужденных колебаний механической системы распределенную нагрузку прошиваемой трубы $q(x,t)$, воздействующую на стержень в процессе прокатки, раскладываем в ряд Фурье. При этом фундаментальные функции собственных колебаний стержня механизма удержания оправки имеют вид:

$$1.\ q(x,t) = \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cdot \cos\left(\frac{k\cdot\pi\cdot x}{\ell}\right);\quad q_0 \ne 0, \tag{5}$$

здесь учтено условие, при котором функция имеет вид:

$$q(x,t) = -q(-x,t).$$

Откуда

$$a_k = \frac{2}{\ell_0}\cdot\int_0^{\upsilon t} q_0\cos\left(\frac{k\cdot\pi\cdot x}{\ell}\right)dx = \frac{2\cdot q_0}{k\cdot\pi}\cdot\sin\left(\frac{k\cdot\pi\cdot x}{\ell}\right)\Bigg|_0^{\upsilon t}.$$

После интегрирования получим

$$a_k = \frac{2q_0}{k\cdot\pi}\cdot\sin\left(\frac{k\cdot\pi\cdot x}{\ell}\right);\quad a_0 = 2q_0\cdot\frac{\upsilon\cdot t}{\ell} \tag{6}$$

$$2.\ q(x,t)=\sum_{k=1}^{\infty} b_k \cdot \sin\left(\frac{k\cdot\pi\cdot x}{\ell}\right);\quad b_0=0,$$

здесь принято во внимание условие, что $q(x,t)=-q(-x,t)$.

После интегрирования находим

$$b_k=\frac{2}{\ell}\int_0^{\upsilon t} q_0\cdot\sin\left(\frac{k\cdot\pi\cdot x}{\ell}\right)dx=\frac{2q_0}{\ell}\cdot\frac{\ell}{k\cdot\pi}\left(-\cos\left(\frac{k\cdot\pi\cdot x}{\ell}\right)\right)\Bigg|_0^{\upsilon t},$$

Окончательно запишем

$$b_k=\frac{2q_0}{k\cdot\pi}\left(1-\cos\left(\frac{k\cdot\pi\cdot\upsilon\cdot t}{\ell}\right)\right). \tag{7}$$

Подставляя (4) и (7) в дифференциальное уравнение (3) и применив алгоритм решения задачи в виде метода Бубнова - Галеркина, имеем

$$\begin{aligned}&\int_0^{\ell}\Bigg\{EI\sum_{k=1}^{\infty}T_k(t)\sin\left(\frac{k\cdot\pi\cdot x}{\ell}\right)\left(\frac{k\cdot\pi}{\ell}\right)^4+\left(P_0+P_1\cos(\omega\cdot t)\right)\times\\&\times\sum_{k=1}^{\infty}T_k(t)\left(\frac{k\cdot\pi}{\ell}\right)^2\left(-\sin\left(\frac{k\cdot\pi\cdot x}{\ell}\right)\right)+m_0\sum_{k=1}^{\infty}T_k''(t)\sin\left(\frac{k\cdot\pi\cdot x}{\ell}\right)-\\&-\sum_{k=1}^{\infty}\frac{2q_0}{k\cdot\pi}\left[\cos\left(\frac{k\cdot\pi\cdot\upsilon\cdot t}{\ell}\right)-1\right]\cdot\sin\left(\frac{k\cdot\pi\cdot x}{\ell}\right)\Bigg\}\cdot\sin\left(\frac{k\cdot\pi\cdot x}{\ell}\right)dx=0\end{aligned} \tag{8}$$

Учитывая свойство ортогональности форм собственных колебаний для стержневой системы механизма удержания оправки при прокатке труб из уравнения (8) следует

$$\begin{aligned}&\int_0^{\ell}\left[EI\left(\frac{k\cdot\pi}{\ell}\right)^4T_k-\left(P_0+P_1\cos(\omega\cdot t)\right)\left(\frac{k\cdot\pi}{\ell}\right)^2\cdot T_k+m_0T_k''\right]\sin^2\left(\frac{k\cdot\pi\cdot x}{\ell}\right)dx=\\&=\int_0^{\ell}\frac{2q_0}{k\cdot\pi}\left[\cos\left(\frac{k\cdot\pi\cdot\upsilon\cdot t}{\ell}\right)-1\right]\sin^2\left(\frac{k\cdot\pi\cdot x}{\ell}\right)dx.\end{aligned} \tag{9}$$

Интегрируя выражение (9),опустив соответствующие знаки суммы, будем иметь следующее уравнение

$$\begin{aligned}&\left\{m_0T_k''+T_k\left[EI\left(\frac{k\cdot\pi}{\ell}\right)^4-\left(P_0+P_1\cos(\omega\cdot t)\right)\left(\frac{k\cdot\pi}{\ell}\right)^2\right]\right\}\frac{\ell}{2}=\\&=\frac{2q_0}{k\cdot\pi}\left[1-\cos\left(\frac{k\cdot\pi\cdot\upsilon\cdot t}{\ell}\right)\right]\int_0^{\ell}\frac{1-\cos^2\left(\frac{k\cdot\pi\cdot x}{\ell}\right)}{2}dx=\\&=\frac{2q_0}{k\cdot\pi}\left[1-\cos\left(\frac{k\cdot\pi\cdot\upsilon\cdot t}{\ell}\right)\right]\cdot\frac{\ell}{2}\end{aligned} \tag{10}$$

После преобразований, перепишем дифференциальное уравнение (10) в виде

 ISSN 1991-7848

$$T_k'' + \frac{EI\left(\frac{k\cdot\pi}{\ell}\right)^4 + \left(P_0 + P_1\cos(\omega\cdot t)\right)\left(\frac{k\cdot\pi}{\ell}\right)^2}{m_0} T_k = \frac{2q_0}{k\cdot\pi\cdot m_0}\left[1-\cos\left(\frac{k\cdot\pi\cdot\upsilon\cdot t}{\ell}\right)\right] \quad (11)$$

Введя общепринятые в литературе обозначения и обозначив частоту колебаний стержня Ω_k согласно [6]

$$\omega_k^2 = \left(\frac{k\cdot\pi}{\ell}\right)^4 \frac{EI}{m_0}; \qquad P_{кр.к} = \left(\frac{k\cdot\pi}{\ell}\right)^2 \cdot EI; \qquad \Omega_k = \omega_k \cdot \sqrt{1 - P_0 / P_{кр.к,}} \quad (12)$$

следовательно, после некоторых упрощений, уравнение (11) примет вид

$$T_k'' + \left[\omega_k^2 - \frac{P_0(k\cdot\pi/\ell)^2}{m_0} - \frac{P_1(k\cdot\pi/\ell)^2}{m_0}\cos(\omega\cdot t)\right]\cdot T_k = \frac{2q_0}{k\cdot\pi\cdot m_0}\left[1-\cos\left(\frac{k\cdot\pi\cdot\upsilon\cdot t}{\ell}\right)\right] \quad (13)$$

Далее, после очевидных преобразований уравнение (13) для удобства анализа динамики рассматриваемой системы представим в параметрической форме

$$T_k'' + \omega_k^2\left[1 - \frac{P_0 + P_1\cos(\omega\cdot t)}{P_{кр.к}}\right]\cdot T_k = \frac{2q_0}{k\cdot\pi\cdot m_0}\cdot\left[1-\cos\left(\frac{k\cdot\pi\cdot\upsilon\cdot t}{\ell}\right)\right], \quad (14)$$

где $P_{кр}$ - критическая сила стержня по Эйлеру; ω_k - частота свободных колебаний стержня оправки.

После подстановок параметров системы (12) и окончательного упрощения дифференциального уравнения (14) получим систему дифференциальных уравнений, удовлетворяющих условиям поставленной задачи

$$T_k'' + \Omega_k^2\cdot\left[1 - 2\cdot\mu_k\cos\left(\omega\cdot t\right)\right]\cdot T_k = \frac{2\cdot q_0}{k\cdot\pi\cdot m_0}\cdot\left[1-\cos\left(\frac{k\cdot\pi\cdot\upsilon\cdot t}{\ell}\right)\right], \quad (15)$$

где Ω_k - частота свободных колебаний стержня, загруженного статической составляющей усилия прошивки заготовки P_0; $\mu_k = \frac{P_1}{2\cdot\left[P_{кр.к} - P_0\right]}$ - коэффициент динамического возбуждения стержневой системы.

Соответственно, коэффициент динамического возбуждения $\mu_к$ и частота свободных колебаний стержневой системы Ω_k определяются из условия взаимного изменения, как технологических параметров очага деформации, так и параметров опорных механизмов.

Полученная система дифференциальных уравнений (15) представлена в виде известных параметрических уравнений Матье–Хилла, что с достаточно высокой точностью описывает динамику системы с учетом интенсивности надвигающейся прошиваемой гильзы (трубы) в

процессе прошивки или винтовой прокатки. Это существенно отличает полученные результаты от результатов ранее известных работ в области исследования динамической устойчивости и виброактивности стержневой системы механизма удержания оправки.

Характерные картины динамических процессов для стержневых систем механизма удержания оправки, получены в результате численного решения дифференциальных уравнений (15), приведенных на рис.4. и рис.5. Они, соответственно, с высокой степенью достоверности описывают и существенно уточняют поведения стержня механизма удержания оправки в осевом направлении для станов винтовой прокатки ТПА 140 и ТПА 350.

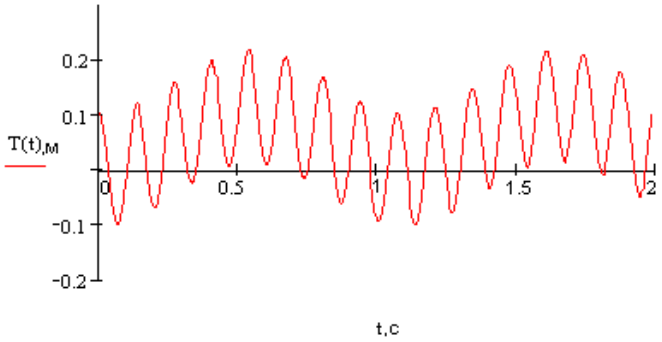


Рисунок 4 - Параметрические колебания стержневой системы механизма удержания оправки прошивного стана трубопрокатного агрегата ТПА-140 (труба ш114х12, сталь20)

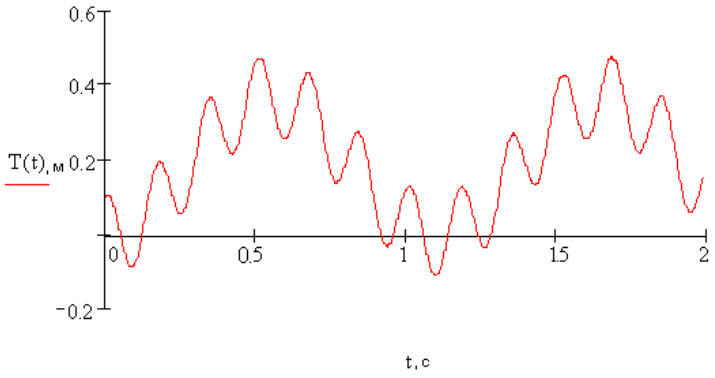


Рисунок 5 - Параметрические колебания стержневой системы механизма удержания оправки прошивного стана трубопрокатного агрегата ТПА-350 (труба ∅219×14, сталь 09Г2С)

 ISSN 1991-7848

ВЫВОДЫ

1. Математическая модель, построенная на основании дифференциального уравнения параметрических колебаний (15), описывает динамические процессы за время реализации всего технологического процесса прошивки.

2. Расчеты динамических процессов на станах винтовой прокатки труб с высокой степенью точности описываются рассматриваемой математической моделью.

3. Полученные результаты указывают на необходимость снижения виброактивности стержня механизма удержания оправки до требуемого уровня.

4. Параметрическая устойчивость стержневой системы механизма удержания оправки, описываемая системой дифференциальных уравнений (15), представлена в виде известных уравнений Матье–Хилла, что сводит анализ задачи к построению диаграммы устойчивости для данной системы [7].

5. Карта устойчивости для данной системы представлена в виде диаграммы Айнса–Стретта (рис. 6) [3,7]. Это позволяет проанализировать возможные области параметрической устойчивости всей стержневой системы, оценить состояние оправки в очаге деформации и выбрать рациональные режимы прокатки труб на прошивных и раскатных станах трубопрокатного агрегата.

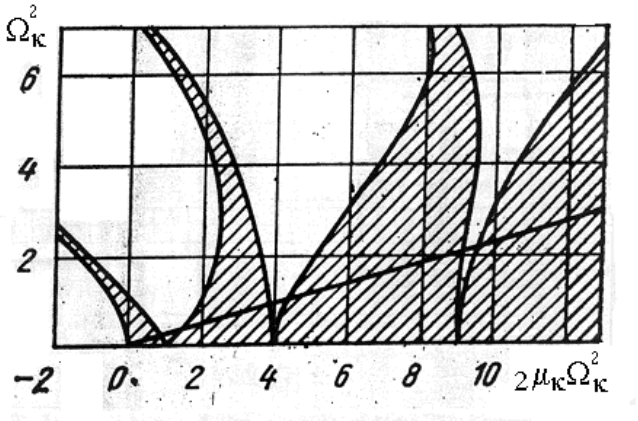


Рисунок 6 - Диаграмма области устойчивости для обобщенной динамической модели параметрических колебаний стержневой системы оправки

6. Увеличение стойкости опорного и упорно-регулировочного механизма обеспечивается значительным снижением виброактивности стержня системы удержания оправки и совершенствованием конструкции центрователей выходной стороны трубопрокатного агрегата.

7. Математическое моделирование процессов прошивки или раскатки бесшовных труб позволяет, на этапе проектирования технологических процессов, установить рациональные режимы эксплуатации станов трубопрокатного агрегата. Следовательно, повышение качества прокатываемых труб достигается путем снижения продольной и поперечной разностенности.

8. Изменение рабочей длины центрирующих роликов опорных механизмов (центрователей) до 800мм и упорно-регулировочного механизма с самоустанавливающимся креплением стержня приводит к значительному снижению уровня параметрических колебаний системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Болотин В.В. Динамическая устойчивость упругих систем/ Гостехиздат, 1956. – 256 с.
2. Оклей Л.Н. Качество горячекатаных труб/ М.: Металлургия, – 1986. – 144с.
3. Джанелидзе Г.О. Устойчивость упругих систем при динамических нагрузках// В кн. Проблемы устойчивости в строительной механике. М., Изд. литературы по строительству, 1965. – 410 с.
4. Лордкипанидзе Д.Л., Чхартшвили И.В. Исследование колебания стержня стана винтовой прокатки. Сообщение Академия Наук Грузинской ССР, , 1977. - №1. – с. 88-91.
5. Сулухия Т.М.,.Адамия Р.Ш., Оклей Л.Н., Ломсадзе Д.М. Разработка мероприятий по предотвращению изгиба стержня оправки автоматического стана ТПА-140 // Труды Грузинского политехнического института, 1976. – с. 71-77.
6. Тавхелидзе С.И.,. Какулия Д.Р.,Адамия Р.Ш., Габелая Ш.Л. Устойчивость стержней станов винтовой прокатки под действием осевых сил. Сообщение Академии Наук Грузинской ССР, 1974. - №2. – с. 73-77.
7. Поновко Я.Г. Основы прикладной теории упругих колебаний/ М.; ГНТИ МЛ, 1957. – 378 с.

 ISSN 1991-7848

УДК621.774.001(075.8)

Рахманов С.Р., Данченко В.Н.

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ КАЛИБРОВКИ ОПРАВОК И ОПТИМИЗАЦИИ ГЕОМЕТРИИ ОЧАГА ДЕФОРМАЦИИ ПРОШИВНОГО СТАНА ТРУБОПРОКАТНОГО АГРЕГАТА

Решена задача по рациональному проектированию и калибровки образующей рабочей поверхности оправок прошивного стана. Из условия минимума функционала осевого сопротивления сформулированы оптимальные условия функционирования оправки в процессе прошивки в постановке задачи Эйлера.

Розв’зана задача з раціонального проектування та калібровки твірної робочої поверхні оправок прошивного стана. Виходячи з умови мінімуму функціонала вісьового опору сформульовані оптимальні умови функціонування оправки в процесі прошивання у постановці задачі Ейлера.

The problem in the rational design and grooving the generatrix of the working surface of the piercing mill mandrels had been solved. The optimal conditions of the mandrel functioning in the piercing process had been formulated from condition of the minimum of the axial resistance of the funcional in the formulation of the Eiler problem.

Введение

Повышение износостойкости оправок и качества прокатываемых труб достигается путем создания рационального инструмента. Данная задача строится на базе существующего технологического процесса прошивки и является весьма актуальной.

Оправки прошивных станов винтовой прокатки бесшовных труб включают последовательно расположенные вдоль оси прошивки носик, профилированную рабочую поверхность с переходом на конус, цилиндрический поясок и коническую поверхность участка выпуска оправки [1].

По мнению авторов, калибровка, применяемая для технологического инструмента, при некотором одновременном улучшении условий в очаге деформации в процессе прошивки, не обеспечивает стабилизацию энергосиловых параметров технологического процесса. Кроме этого, оправки, ввиду несовершенства формы образующей рабочей поверхности имеют низкую долговечность.

При эксплуатации большинства отечественных и зарубежных прошивных станов применяется распространенная оправка, выполненная в виде осесимметричного тела.

Калиброванная оправка состоит из цилиндрического центрирующего носика, рабочего участка, профилированного по стационар-

© РАХМАНОВ С.Р., ДАНЧЕНКО В.Н., 2008

ной сфере, цилиндрического пояска и замыкающего выпускающего конуса [2].

Вследствие несовершенства формы рабочей поверхности оправка, нагруженная со стороны потока обтекающего металла, склонна к повышенному износу, что приводит в ряде случаев к порезам гильз и к образованию плен.

Изношенная оправка при прошивке металла вызывает ассиметричную внешнюю нагрузку в очаге деформации, что приводит к ее уходу от оси прошивки и заклиниванию в металле.

По своей сущности к предлагаемому способу калибровки наиболее близким является калибровка оправки для прошивных станов трубопрокатного агрегата, включающая профилирование калиброванной ее рабочей поверхности. Причем рабочая поверхность оправки калибрована из условия соблюдения постоянства очага деформации по сфере и выполнена с увеличивающимся диаметром в виде осесимметричного тела [3].

Однако, исходя из реальной геометрии очага деформации для реализации устойчивого технологического процесса, ввиду особенности винтовой прокатки, не могут быть использованы оправки, калиброванные на основе принципа постоянства деформации.

При реализации технологического процесса прошивки на изношенных оправках происходит значительное увеличение усилия прошивки, что вызывает усиление колебаний стержня оправки и дальнейшую потерю его устойчивости (рис.1).

Данная работа направлена на повышение эксплуатационной стойкости технологического инструмента и качества прокатываемых труб путем оптимизации геометрических параметров образующей рабочей поверхности оправки. Это достигается тем, что образующая рабочей части и конуса оправки калибрована по одной рациональной кривой переменного увеличивающегося радиуса R(x) по всей длине рабочего участка оправки (вывод формул для рациональных калибровок оправок будет приведен ниже).

Остановимся более подробно на составлении математической модели задачи по калибровке обтекаемой оправки рациональной формы для принятой расчетной схемы согласно рис.1. и рис.2.

Калибровка рабочего участка оправки выполнена на основе следующих предпосылок и рассуждений.

Рассматриваем безотрывное обтекание металлом оправки в процессе прошивки, что дает возможность, исходя из динамической аналогии, определить энергосиловые параметры в очаге деформации. Определение напряженно-деформированного состояния в очаге де-

 ISSN 1991-7848

формации, как на этапе внедрения оправки в сплошную цилиндрическую заготовку, так и в процессе ее прошивки представляется возможным аналитически.

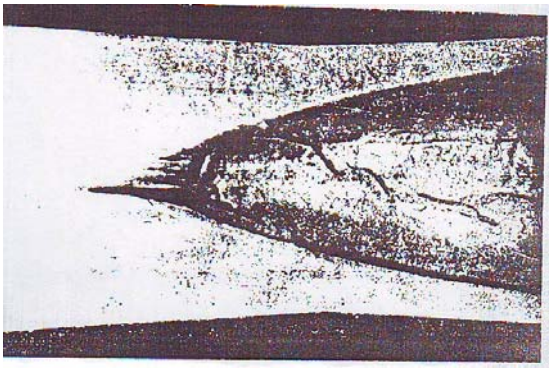


Рисунок 1 - Мгновенный очаг деформации в процессе прошивки на прошивном стане трубопрокатного агрегата согласно[3]

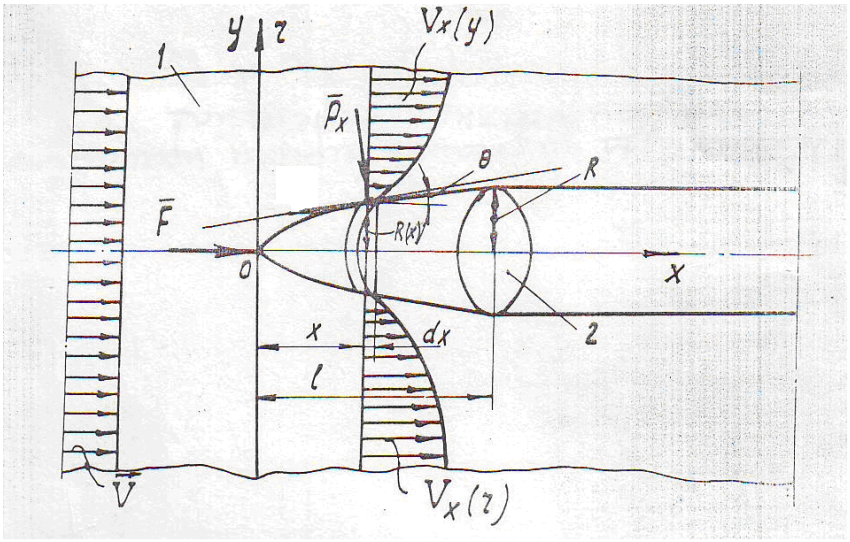


Рисунок 2 - Расчетная схема для составления математической модели и решения задачи по рациональной калибровке оправки

Решение задачи в общем виде возможно получить с применением уравнений сплошной среды и математической физики для вязких, упруго-пластических и вязкопластических моделей очага деформации. Тогда, для пластической области и области с трещинообразованием, в расширенной постановке, решение задачи можно представить на основе рассмотрения динамического равновесия прошиваемого металла в очаге деформации.

Необходимо отметить, что калибровка рабочего участка и конуса оправки неразрывно связана с рассмотрением и решением задачи о движении осесимметричного тела (оправки) в потоке металла. Необ-

ходимо и достаточно, чтобы оправка обладала наименьшим осевым сопротивлением технологической рабочей среде (в металле) в процессе прошивки. Считаем, что оправка не деформируема и, соответственно, механические свойства прошиваемого металла и оправки несоизмеримыми. Из условия зеркального отражения частиц металла (рабочей среды) от поверхности оправки, для нормальной составляющей давления на поверхности оправки, исходя из теоремы Эйлера, согласно результатам работы [4], в рамках рассматриваемой динамической модели задачи имеем следующее выражение:

$$p=2\ \psi\ \rho \nu I\ \sin I\theta.$$

Здесь ψ – поправочный коэффициент, учитывающий реальные условия формирования очага деформации, определяемый согласно ψ=0,85 - 0,96 [5]; ρ – плотность прошиваемого металла при заданной температуре рабочей среды;ν – скорость металла относительно носика оправки в процессе прошивки;θ – угол между полной скоростью рабочей среды(металла) на поверхности оправки и ее тангенциальной составляющей.

Необходимо отметить, что данное выражение хорошо согласуется с аппроксимациями результатов многочисленных экспериментальных исследований [1, 4 ,5]. Принимая во внимание то, что полное давление перпендикулярно к рабочей поверхности оправки, для давления металла на оправку (на кольцо бесконечно малой ширины $\sqrt{1+[f'(x)]^2}\ dx$ и радиуса r(x)) получим:

$$dF = 2\psi \rho \nu I\ \sin I\theta[2\pi r(x)\ \sqrt{1+[f'(x)]^2}\ dx\ \sin\theta]. \qquad (1)$$

После интегрирования выражения (1) по всей длине рабочей поверхности оправки получим полную силу осевого сопротивления оправки, действующую в положительном направлении оси прошивки:

$$F = \int_0^l 4\pi\psi\rho\nu I \sin i\theta\ r(x)[1+[f'(x)]I]S\ dx. \qquad (2)$$

При некотором упрощенном рассмотрении задачи можно предположить, что для малых углов наклона касательной к оси прошивки θ величина $\sin\theta$ приближенно определяется выражением $f'(x)$.

Тогда осевое сопротивление оправки для квазистационарного процесса прошивки, следовательно, находится в виде:

$$F = \int_0^l 4\pi\ \psi\ \rho \nu I\ [f'(x)]^3\ r(x)\ dx. \qquad (3)$$

Откуда видно, что функционал осевого сопротивления оправки потоку прошиваемого металла определяется согласно (3) как

 ISSN 1991-7848

F[r(x), $f'(x)$] и имеет непрерывные частные производные по всем аргументам на рассматриваемом отрезке очага деформации.

Из вышеизложенного следует, что задача по оптимизации параметров оправки и геометрии очага деформации сводится к распространенному виду классических задач. Данная задача имеет определенные ограничения по поиску минимума функционала осевого сопротивления на множестве нормированного пространства очага деформации, что требует установить линейно однородную функцию для образующей оправки r(x).

Поскольку в данном случае, как следует из выражения (3), функционал не явно зависит от текущей координаты **x**, т.е. F[r(x), $f'(x)$]= F[R(x), R′(x)], в этом случае известное уравнение Эйлера [6] примет вид:

$$-f'(x)\,F_{ff'} - f''(x)\,F_{ff'} = 0. \qquad (4)$$

Умножив обе части уравнения (4) на $f'(x)$, в левой части получим точную производную от функционала осевого сопротивления:

$$\frac{d}{dx}\left[F - f'(x)F_{f'}\right] = 0\,. \qquad (5)$$

откуда после следующего интегрирования имеем преобразованные интегрируемые типы известных уравнений Эйлера [6].

$$F - f'(x)F_{f'} = c\,, \qquad (6)$$

где c – постоянная интегрирования задачи.

Полученное уравнение может быть легко проинтегрировано путем разрешения относительно $f'(x)$ и разделения переменных или путем введения параметров [7, 8].

Среди всех функций r(x), определяющих форму образующей оправки, удовлетворяющих граничным условиям задачи r(0)=0 и r(l)=R, необходимо найти ту функцию, которая доставляет слабый экстремум сформированному функционалу осевого сопротивления оправки (3) из выражения (6).

Экстремум функционала осевого сопротивления оправки из (3) может быть реализован только на тех экстремалях, которые удовлетворяют условиям на границах оправки, при которых осевое сопротивление оправки $\overline{F}$ примет возможное наименьшее значение.

Уравнение Эйлера(6) для функционала осевого сопротивления из (3) при этом после небольших преобразований имеет вид:

$$[f'(x)]\text{i-3}\frac{d}{dx}[r(x)\,[f'(x)]\text{I}] = 0, \qquad (7)$$

где c =0.

В силу принятых граничных условий, частное решение уравнения (8) для рассматриваемой задачи не приемлемо.

Уравнение (7) для удобства решения перепишем в виде:

$$[f'(x)]i+3r(x)f'(x)f''(x)=0. \qquad (8)$$

Умножая обе части уравнения (8) на $f'(x)$, отметим, что левая часть есть ничто иное, как $\frac{d}{dx}\{[f'(x)]i\ r(x)\}$.

Интегрируя выражение (8) соответственно находим:

$$[f'(x)]i\ r(x)=\tilde{c}. \qquad (9)$$

После соответствующих преобразований получим следующее:

$$f'(x)=\frac{\tilde{c}}{\sqrt[3]{f(x)}}$$

или после интегрирования окончательно запишем

$$r(x)=(c_1x+c_2)s. \qquad (10)$$

Постоянные интегрирования c_1 и c_2 определяем из (10) , согласно граничным условиям задачи с учетом реальных (возможных) калибровок оправок:

1.Для оправки без носика имеем следующие граничные условия:

$$\text{при } x=0,\ r(x)=0. \qquad (11)$$
$$\text{при } x=1,\ r(x)=R.$$

Тогда из (10) с учетом (11) имеем:

$$c_1=\frac{R^{4/3}}{l}, \qquad c_2=0. \qquad (12)$$

2. Для оправки с формированным цилиндрическим центрующим носиком имеем следующие граничные условия:

$$\text{при } x=0,\ r(x)=R^0. \qquad (13)$$
$$\text{при } x=l,\ r(x)=R.$$

Тогда из уравнения(10) с учетом (13) получим:

$$c_1=\frac{R^{4/3}-R_0^{4/3}}{l}; \qquad c_2=R_0^{4/3}. \qquad (14)$$

После соответствующих подстановок постоянных интегрирования (12) и (14) в уравнение (10) и преобразований получим выражения для определения дуги образующей рабочего участка оправок соответственно:

1.Для оправки без цилиндрического носика имеем:

$$r(x)=R(x)=R(\frac{x}{l})s\ . \qquad (15)$$

2. Для оправки с цилиндрическим носиком получим

 ISSN 1991-7848

$$r(x)= R(x)= [\ R^{4/3}\frac{x}{l}+ R_0^{4/3}(1-\frac{x}{l})]s, \qquad (16)$$

где R_0 - радиус носика оправки; R - радиус калибрующего участка оправки; l - длина рабочей части и конуса оправки; **x**- текущая координата по оси оправки.

Полученные (15) и (16) после подстановок в выражение (4) и аналитических преобразований показывают, что образующая оправки, калиброванная по данному способу, является обтекаемой параболой заданной степени точности с заданными условиями формирования геометрии очага деформации. Это при прочих равных условиях обеспечивает минимум осевого сопротивления оправки потоку металла при прошивке.

Для стабильности процесса прошивки в особых точках образующей оправки на кривую R(x) наложены определенные ограничения. Так, например, при $x=l$ достигается $f'(x)= \mathrm{tg}\,\theta$. Откуда имеем, что угол выходного конуса оправки определяется как $\theta = \mathrm{arctg}(f'(x))$. Для оправок используемых в реальных условиях, θ достигает величины $2\div3^{\circ}$. Это дает основание выполнить калибровку рабочего участка оправки по одной сопряженной гладкой кривой R(x) согласно выражениям (15) и (16). Из вышеизложенного следует, что анализ вариационной задачи Эйлера с ограничениями на реализацию функционала осевого сопротивления на множестве нормированного пространства очага деформации выполняется при соблюдении критерия Вейерштрасса-Эрдмана. Следовательно, определить функцию образующей рабочей поверхности оправок и решить задачу по проектированию гаммы технологического инструмента становится возможным.

Обтекаемая оправка состоит из следующих участков: цилиндрический центрующий носик, объединенная рабочая часть и конус, сопряженные по одной обтекаемой кривой, цилиндрический калибрующий поясок и конус выпуска.

Рациональная форма рабочей поверхности оправки за счет стабилизации усилия прошивки обеспечивает реализацию устойчивого технологического процесса. При этом одновременно достигается повышение динамической устойчивости стержня оправки путем исключения нежелательного искажения очага деформации.

Результаты промышленных испытаний оправок диаметром 77 мм при прошивке гильз размером 97х10 из стали 20 на прошивном стане ТПА-140, изготовленных с применением различных технологий, сведены в таблицу.

Предлагаемая рациональная калибровка оправок приводит к существенному снижению усилия прошивки (осевого сопротивления) со стороны потока прошиваемого металла. Рациональная профилиро-

ванная поверхность рабочего участка оправки способствует стабильному удержанию оправки на оси прокатки и ограничивает перекос оправки в очаге деформации.

Калиброванная из условия минимума осевого сопротивления оправка исключает появление некомпенсируемого опрокидывающего момента со стороны стержневой системы механизма удержания оправки, что позволяет обеспечить необходимые устойчивые условия реализации всего технологического процесса прошивки.

Таблица

Технико-экономические показатели использования оправок ∅77 мм на прошивном стане ТПА-140 в зависимости от технологии их производства

№ п/п	Способ изготовления оправок и материал		Количество прошитых гильз, шт.	Качество гильз		Усилия прошивки, кН	
				Продольная разностен-ность, мм	Выход годного, %	Расчетная величина	Экспериментальная величина
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Литье 20ХН3ФЛ	а	450÷500	1,5÷1,8	87	237,8	310,4
		б	670÷900	1,0÷1,2	92	187,4	210,5
2	Кованные 20ХН4ФА	а	1200÷1300	1,5÷1,7	89	254,5	305,2
		б	2100÷2180	0,9÷1,2	94	187,4	227,5
3	Закованные 35ХН2ФА	а	1500÷1900	1,2÷1,5	90	285,8	320,2
		б	2070÷2200	1,0÷1,1	93	187,4	200,8
4	Точёные из проката 20ХН4ФА	а	1300÷1500	0,9÷1,4	90	218,5	250,3
		б	1800÷1900	0,8÷1,0	95	187,4	208,4
5	Штампованные 12ХН3ФА	а	2800÷2900	0,9÷1,5	94	213,7	280,5
		б	3250ч÷3750	0,8÷1,0	97	187,4	190,4

а) существующая калибровка; б) рациональная калибровка

Для станов винтовой прокатки труб применение оправок, калиброванных по предложенной методике, за счет оптимизации формы ее рабочей поверхности, позволяет значительно снизить усилия прошивки и в целом энергосиловые параметры очага деформации (14-21%).

ВЫВОДЫ

1. Анализ полученных результатов показывает, что независимо от способа производства оправки эффективность процесса прошивки достигается путем минимизации осевого сопротивления.

 ISSN 1991-7848

2. Профилирование поверхности рабочего участка на некоторой рациональной кривой R(x)= r(x) при прочих равных условиях позволяет значительно интенсифицировать технологический процесс. Использование рациональной оправки диаметром 77 позволяет увеличить скорость прошивки на 5,0÷7,0 %. Одновременно достигается повышение эксплуатационной стойкости оправок прошивного стана на 20÷25%, путем создания благоприятных условий обтекания прошиваемым металлом рабочей поверхности рациональных оправок.

3. Оптимизацией образующей оправки обеспечивается стабильность геометрии очага деформации и сохранение сплошности покрытия рабочей поверхности. Как следствие, исключается налипание металла на оправку и тем самым улучшение качества поверхности гильз, что приводит к снижению пленообразования, поперечной и продольной разностенности готовых труб на 7÷12%.

4. Использование технологического инструмента, имеющего рациональные параметры, позволяет, при прочих, увеличить его срок службы в 2,5÷3 раза и повысить качество производимых труб на 12÷14 % , в результате оптимизации процессов прошивки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дубровский И.В., Матлахов Л.И. Новая форма оправок для станов Штифеля / Сталь, 1946. - №1. – с. 14-16.
2. Матвеев Ю.М., Ваткин Я.Л. Калибровка валков и инструмента трубных станов / М: Металлургиздат,1951. - с. 212.
3. Данилов Ф.А., Глейберг А.З., Балакин В.Г. Производство стальных труб горячей прокаткой / М: Металлургдат,1954, с. 328.
4. Розов Н.В.Производство труб. Справочник / М: Металлургия,1974.-598с.
5. Грудев А.П., Машкин Л.Ф., Ханин М.И. Технология прокатного производства / М:Металлургия,1994. - 656с.
6. Ваткин Я.Л., Ваткин Ю.А. Трубное производство.-М.:Металлургия.-1970. - 512с.
7. Технология трубного производства. Учебник для вузов/ В.Н.Данченко, А.П.Коликов, Б.А.Романцев, С.В.Самусев // М.: Интермет - Инжиниринг, 2002.-640с.:ил.
8. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров / М: Наука,1968.-720с.

УДК 621.774.2:621.778.029

Б.П. Середа, Ю.В. Бондаренко, Ю.А. Белоконь

ПОЛУЧЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКИХ И АНТИКОРРОЗИОННЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ ЭЛЕМЕНТОВ МУФТОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТРУБ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СВС-ТЕХНОЛОГИЙ

Розглянута СВС-технологія одержання захисних покриттів на елементах муфтових з'єднаннях труб у режимі теплового самозапалювання. Приведено можливу схему формування покрить. Приведено порівняльні дані іспитів зносостійкості та корозійної стійкості зразків з СВС-покриттями, отриманими за традиційною технологією хіміко-термічної обробки.

Рассмотрена СВС-технология получения защитных покрытий на элементах муфтовых соединениях труб в режиме теплового самовоспламенения. Приведена предположительная схема формирования покрытий. Приведены сравнительные данные испытаний износостойкости и коррозионной стойкости образцов с СВС-покрытиями, полученными по традиционной технологии химико-термической обработки.

The SHS-technology of retrieving protective coatings on elements socket joints of tubes in a mode of thermal spontaneous combustion is reviewed. The presumable scheme of formation of coatings is adduced. The comparative test datas of a wear resistance and corrosion stability examples with SHS-coatings that had obtained by conventional technology of chemical-heat treatment are adduced.

Введение

В настоящее время подготовка поверхности труб и элементов соединительных муфт для нефтедобывающей промышленности становится все более важным аспектом. Особый акцент делается на соединение многократного использования без заеданий.

Поэтому возникает необходимость защиты элементов муфтовых соединений труб путем создания защитного покрытия. Решению этой проблемы посвящено множество работ, получены значимые результаты, однако и в настоящее время она остается актуальной [2].

В связи с этим представляет интерес разработка новых технологий, позволяющих при минимальных затратах энергии и времени формировать на материалах покрытия с высокими триботехническими свойствами. Одной из важных и интересных технологий создание на рабочей поверхности изделий защитных покрытий на основе самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) [3].

В отличие от известных способов борирования [4] формирование покрытия методом СВС происходит в неизотермических условиях, при которых существенную роль играют химические транспортные

© Б.П. СЕРЕДА, Ю.В. БОНДАРЕНКО, Ю.А. БЕЛОКОНЬ, 2008

 ISSN 1991-7848

реакции. Такие реакции протекают в порошковых смесях за счет газовых носителей при наличии градиента температур. Реализация химического транспорта обеспечивается путем последовательной смены отдельных температурных стадий, характеризуемых изменением уровня температуры в каждой точке смеси от первоначального значения до температуры горения.

Анализ реакций, происходящих при горении СВС-смеси, а также результатов экспериментов и металлографических исследований позволили получить схему образования борированного слоя в режиме горения. Этот процесс условно можно разделить на три стадии.

Стадия прохождения волны горения (стадия I) характеризуется первичным прогревом образца и формированием газовой фазы, обогащенной бором, при этом покрытие на поверхности образца не образуется.

На стадии прогрева образца (стадия II) активные атомы начинают диффундировать в его поверхностный слой за счет высокого потенциала, предопределяемого градиентом концентрации. Наблюдается формирование диффузионного слоя, представляющего собой фазу Fe2B.

При охлаждении реактора (стадия III) понижается активность формирования покрытия из-за уменьшения коэффициента диффузии насыщающего компонента при снижении температуры. Как показали результаты металлографического анализа, толщина данного слоя составляет 7-10 мкм, в поверхностном слое охлажденного образца наблюдается фаза (Fe, Cr)2B.

Процесс формирования борированных покрытий в режиме теплового самовоспламенения условно можно разделить на пять стадий.

На начальной стадии (стадия I) происходит инертный прогрев смеси. При использовании в качестве поставщика основного диффундирующего элемента – технического бора – наблюдается формирование борированного слоя; при использовании оксида бора имеет место только прогрев образца и реакционной шихты до температуры самовоспламенения.

Тепловое самовоспламенение реакционной смеси (стадия II) характеризуется повышением ее температуры со скоростью 200-400° С/с до максимального значения. На этой стадии наряду с образованием активных атомов бора происходит выделение элементарного хрома и его соединение с носителем (фтором или йодом).

На стадии прогрева образца имеет место падение температуры процесса до величины, соответствующей расчетной температуре борирования. При этом активные атомы хрома диффундируют в метал-

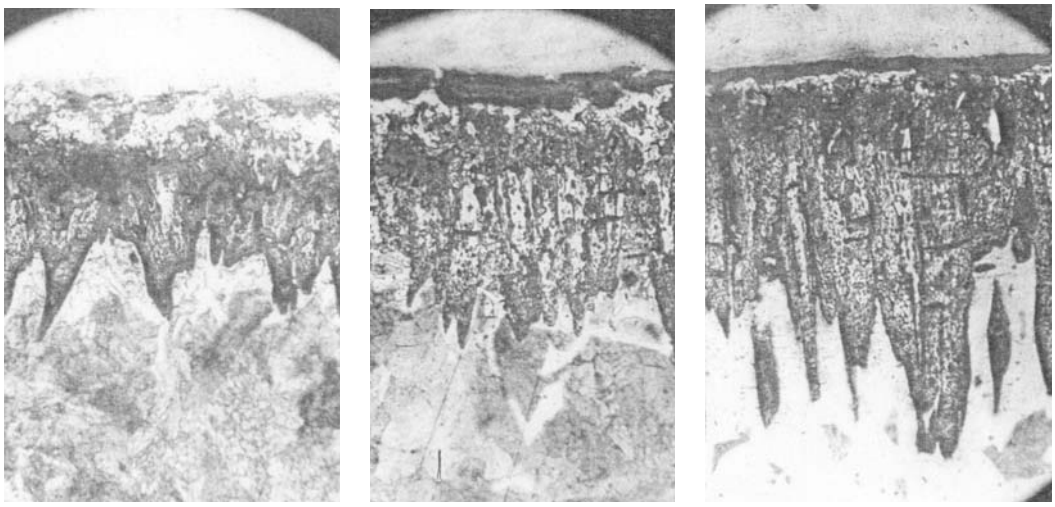
лическую подложку и начинает формироваться легированная боридная фаза (Fe, Cr, Al)B.

В процессе изотермической выдержки (стадия IV) происходит формирование постоянного диффузионного потока активных атомов бора. При этом наблюдается рост борированного слоя и легирование его хромом. Под высокоборидной фазой начинает формироваться гемиборид железа, легированный хромом и алюминием. При повышении длительности изотермической выдержки наблюдается увеличение толщины борированного диффузионного покрытия, которое подчиняется параболическому закону. На этой стадии температура в реакторе не изменяется и протекают процессы, аналогичные диффузионному насыщению в стационарных условиях. Следует отметить, что при СВС-процессе насыщение происходит в порошковой среде только что восстановленных атомов бора и хрома. Кроме того, аустенит, образовавшийся при резком росте температуры, характеризуется повышенной плотностью дислокаций, мелкозернистостью и мелкоблочностью. В связи с этим на стадии IV процессы диффузионного насыщения в таких средах протекают более активно.

На стадии охлаждения (стадия V) формирование боридного слоя происходит с меньшей активностью за счет уменьшения коэффициента диффузии бора. Легированное борированное покрытие состоит из двух фаз (Fe, Cr, A1)B и (Fe, Cr, A1)$_2$B.

Полученный борированный слой состоит из двух зон: зоны боридов (химических соединений бора и железа) и переходной зоны (твердого раствора бора в железе). Боридная зона (боридный слой) характеризуется игольчатым строением, причем на техническом железе и низкоуглеродистых сталях она менее компактна, чем на среднеуглеродистых сталях. При увеличении температуры и продолжительности насыщения возрастают как общая толщина борированного слоя, так и толщина сплошного слоя боридов. Величина последнего увеличивается более интенсивно, что способствует повышению его компактности. Борированное покрытие, полученное в условиях теплового самовоспламенения при температуре $t_в$ 900 - 1050° С, может представлять собой как однофазный, так и двухфазный слой. Разработанные составы СВС-смесей позволяют получать однофазные легированные слои типа (Fe, Cr, A1)$_2$B при содержании бора, изменяющемся в пределах 7 - 11 %. Во всех остальных случаях боридный слой имеет двухфазное строение: (Fe, Cr, A1)B и (Fe, Cr, A1)$_2$B (рис.1).

 ISSN 1991-7848



а б в

Рисунок 1 – Микроструктура борированных покрытий, полученных методом СВС на стали 45 при $\tau_в$=60 мин, ×250; а – tв=950° С; б – tв=1000° С; в – tв=1050° С

Легированный высший борид, расположенный в поверхностной зоне, также имеет игольчатое строение. При борировании стали У8А содержание высокоборидной фазы понижается, к иглам боридов примыкают пористые выделения борокарбидной фазы $Fe_3C_{0,2}B_{0,8}$. При формировании двухфазных боридных покрытий содержание высшего борида изменяется в широких пределах. При уменьшении активности насыщающей среды образуются слои, содержащие наряду с боридом типа Fe_2B борокарбиды типа $Fe_{23}(CB)_6$ или $Fe_3(CB)$.

Заключение о легированности боридов хромом и алюминием сделано на основании результатов химического анализа полученных покрытий, которые свидетельствуют о присутствии хрома и алюминия в боридной зоне. Кроме того, наблюдается некоторое смещение дифракционных максимумов боридных фаз от положений, соответствующих чистым боридам железа. Следует также отметить, что соотношение дифракционных максимумов боридных фаз не соответствует табличным данным из-за образования текстуры в процессе роста фаз данного типа. Исследования на рентгеновском микроанализаторе свидетельствуют о том, что хром в процессе насыщения диффундирует в поверхностный слой покрытия и располагается преимущественно по длине игл боридов железа FeB, его концентрация достигает 1,4-2,7 %. Алюминий проникает на всю толщину борidного покрытия, его содержание составляет 0,8- 1,3 %.

При испытании на приборе ПМТ-3 двухфазного борированного слоя установлено, что микротвердость высокоборидной фазы колеблется в пределах 18000-20000 МПа, а микротвердость фазы (Fe, Cr, A1)$_2$B - в пределах 13500- 15000 МПа.

В процессе однофазного борирования изменение микротвердости полученного покрытия по толщине упрочненного слоя практически не зафиксировано. При увеличении содержания углерода в стали микротвердость покрытия уменьшается и колеблется в пределах 14000- 16000 МПа.

Высокая микротвердость борированного слоя и низкая микротвердость металлической подложки обусловливают необходимость обязательной термической обработки изделия, позволяющей исключить продавливание данного слоя в условиях эксплуатации. Термическая обработка борированной стали 45 заключалась в закалке от температуры 820° С в воде и отпуске при температуре 170° С в течение 1 ч. После термической обработки происходит измельчение зерна как в боридной зоне, так и в расположенной под ней зоне с повышенным содержанием углерода и бора, что повышает уровень механических свойств и благоприятно сказывается на работоспособности среднеуглеродистых сталей. Микротвердость сталей увеличивается с 4000 до 7000-9000 МПа. Результаты изучения распределения бора и углерода по толщине переходной зоны представлены представлены в таблице 1 ($t_в$= 950° С; $\tau_в$ = 1 ч).

При борировании стали У8А непосредственно к иглам боридов примыкают пористые выделения бороцементита с микротвердостью, равной 10000- 11000 МПа.

Таблица 1

Результаты изучения распределения бора и углерода по толщине переходной зоны ($t_в$= 950° С; $\tau_в$ = 1 ч)

Расстояние от боридной зоны, мм	0,10	0,30	0,50	0,70	0,90
Содержание бора, % (по массе)	0,0230	0,0015	0,0012	0,0010	Следы
Содержание углерода, % (по массе)	0,59	0,56	0,53	0,51	0,48

Установлено, что износостойкость двухфазных и однофазных легированных борированных слоев соответственно в четыре и два раза выше износостойкости термообработанного образца из стали 45, не подвергнутого химико-термической обработке, а легирование двухфазного борированного слоя хромом и алюминием в условиях СВС позволяет повысить его стойкость на 25-30 %.

Как видно из сопоставительных данных по износостойкости полученных покрытий, ее величина при прочих равных условиях оп-

 ISSN 1991-7848

ределяется твердостью поверхностной фазы. Так, величина износа двухфазных легированных борированных покрытий на 25-30 % меньше, чем для нелегированных покрытий. Как показали результаты испытаний в абразивно-масляной среде, качественный характер процесса изнашивания поверхностного слоя не изменяется, но при этом наблюдается увеличение общей массы изношенного материала. Образцы с двухфазными легированными боридными слоями изнашиваются в 3-5 раз меньше, чем образцы без покрытия.

Результаты испытаний на жаростойкость боридных покрытий (согласно ГОСТ 6130-71, т.е. с использованием цилиндрических образцов диам. 10,0 ± 0,2 мм и длиной 20,0 ±0,5 мм при температурах 600, 700 и 800° С со взвешиванием на аналитических весах ВЛР-200 через каждые 10 ч испытаний) зафиксировали повышение сопротивляемости стали процессу окисления. Борированные покрытия, полученные методом СВС, по жаростойкости превосходят на 50-60 % аналогичные покрытия, сформированные в стационарных условиях [1]. Износостойкие слои на основе легированных боридов железа наносили на поверхность кондукторов, кондукторных втулок и цанг, применяемых в инструментальном производстве. Достигнуто повышение срока службы данных деталей в 2,7-3,0 раза. Износостойкость инструментов и оснастки, изготовленных из штамповой стали и обработанных по технологии СВС, в 2,5-2,8 раза больше, чем без покрытия.

Выводы

Борирование стали в условиях СВС способствует получению на ее поверхности высококачественных диффузионных покрытий. Упрочнение поверхностных слоев углеродистых сталей методом СВС позволяет получить одно- и двухфазные борированные покрытия, легированные хромом и алюминием, с износостойкостью на 50-60 % выше, чем после борирования стандартным методом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Химико-термическая обработка металлов и сплавов. В.Борисенок, Л.А.Васильев, Л.Г. Ворошнин и др. / Л.: Машиностроение, 1981.– 424 с.
2. Р.Ю. Алешин. Износостойкое и антикоррозионное фосфатное покрытие муфтовых соединений труб нефтяного сортамента / – Сталь, 2005.– №7. - с. 81– 83.
3. Коган Я.Д., Середа Б.П., Штессель Э.А. Высокоинтенсивный способ получения покрытия в условиях СВС // МиТОМ. №6, 1991. – С. 39-40
4. Ворошнин Л.Г. Борирование промышленных сталей и чугунов. / Минск: Беларусь, 1981.–205 с.

УДК 621.774.015:006.31.8

Сокуренко В.П., Ворона В.М., Кобякова Т.М., Киселева А.Б.

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАБОТ ПО ГАРМОНИЗАЦИИ СТАНДАРТОВ НА ТРУБЫ

Державна політика України у сфері технічного регулювання та споживчої політики спрямована на удосконалення діючого законодавства, впровадження технічних регламентів, гармонізацію національних стандартів з міжнародними та європейськими. ДП „НДТІ” було розроблено 27 національних гармонізованих стандартів на основні види сталевих труб і методи їх випробувань та контролю. Найскладніші питання – освоєння зарубіжних марок сталі та нових методів випробувань та контролю. Гармонізація стандартів дозволила створити сучасну нормативну базу щодо виробництва продукції за єдиними вимогами як для внутрішнього ринку, так і на експорт.

Государственная политика Украины в области технического регулирования и потребительской политики направлена на усовершенствование действующего законодательства, введения технических регламентов, гармонизацию национальных стандартов с международными и европейскими. ГП „НИТИ” было разработано 27 национальных гармонизированных стандартов на основные виды стальних труб и методы их испытаний и контроля. Наиболее сложные вопросы – освоение зарубежных марок стали и новых методов испытаний и контроля. Гармонизация стандартов позволила создать современную нормативную базу и изготавливать продукцию по единым требованиям как для внутреннего рынка, так и на експорт.

The state policy of Ukraine in the field of technical regulation and consumer-related policy is aimed at the improvement of the present laws, introduction of technical regulations, harmonization of national standards with International and European standards. SE "NITI" has developed 27 national harmonized standards on main types of steel tubes and the methods of their testing and control. The most complicated problem is assimilation of foreign steel grades and new methods of testing and control. Standard harmonization has made it possible to establish a national normative base and make products according to unified requirements for both domestic and foreign markets.

Вступление Украины в ВТО и значительный экспортный потенциал ее металлургического производства поставили перед предприятиями задачу поставки металлопродукции такого уровня качества, который отвечает современным передовым требованиям. В настоящее время эти требования для металлопродукции отражены в подавляющем количестве случаев в стандартах европейского сообщества (EN) и стандартах Всемирной организации по стандартизации (ISO).

В 2001 г. в Украине принят ряд законов, которые соответствуют принципам европейского законодательства: «О стандартизации» [1], «Об оценке соответствия» [2], «Об аккредитации органов по оценке

© СОКУРЕНКО В.П., ВОРОНА В.М., КОБЯКОВА Т.М., КИСЕЛЕВА А.Б., 2008.

соответствия» [3]. Принятые в Украине законы о стандартизации и техническому регулированию определили достаточно четко переход нашей страны на европейскую методологию стандартизации (Новый и Глобальный подход), предусматривающую разработку обязательных технических регламентов, которые соответствуют европейским директивам, и разработку государственных стандартов, применяемых на добровольной основе.

С целью дальнейшего совершенствования законодательной базы в области стандартизации и приведения ее в практически *полное* соответствие с европейской и международной в декабре 2005 г. принят закон Украины «О стандартах, технических регламентах и процедурах оценки соответствия» [4], определяющий основополагающие принципы государственной политики в сфере стандартизации, технического регулирования и оценки соответствия.

Таким образом, в Украине приведены в соответствие общие вопросы системы стандартизации – законы и Технические регламенты. Но к ним необходимо разработать национальные стандарты, соответствующие этим регламентам, и гармонизированные с международными и европейскими стандартами.

Приведение нормативной документации в соответствие с зарубежными стандартами позволит:

- унифицировать размеры и допускаемые отклонения от них, что обеспечит взаимозаменяемость продукции, снизит ее себестоимость и, следовательно, повысит ее экспортный потенциал;

- установить единые или близкие к ним требования к марочному составу сталей, что значительно снизит расход металла, т.к. одни и те же марки стали будут использоваться и отечественным и зарубежным потребителем;

- обеспечить единообразие метрологических требований к методам контроля и испытаний;

снизить затраты на сертификацию продукции на основе взаимного признания результатов сертификации.

При проведении работ по гармонизации стандартов необходимо исходить из следующих положений:

- количество гармонизированных стандартов не определяет рост экспортного потенциала;

- ориентироваться нужно на производство продукции массового использования;

- унифицировать необходимо, в первую очередь, марки стали, поставка которых за рубеж уже производится, и их освоение не потребует значительных изменений в технологии производства;

первоочередным является приведение в соответствие размерного ряда;

- значительная доля методов испытаний и контроля качественных характеристик труб по отечественным и зарубежным стандартам близка, поэтому целесообразно поэтапное прямое применение зарубежных стандартов. Исключение составляют методы неразрушающего контроля готовой продукции. Без полного введения на предприятиях этих методов невозможно расширение экспорта.

Технический комитет ТК 8 "Трубы и стальные баллоны" (ГП «НИТИ») систематически изучает требования международных и европейских стандартов с целью их принятия в качестве национальных.

В 2005-2007 годах ТК 8 было разработано 27 национальных стандартов, гармонизированных с международными (ISO) и европейскими (EN) стандартами, в том числе:

12 – на трубы,

6 – на методы механических испытаний,

2 – на контроль межкристаллитной коррозии,

7 – на неразрушающий контроль.

Из гармонизированных двадцать шесть стандартов классифицировано как идентичные по своей структуре, техническому содержанию и изложению в соответствии с ДСТУ 1.7:2001 [5]. Один стандарт - ДСТУ 4581-4:2006 [6] (гармонизированный с ISO 9329-4:1997 [7]) – модифицированный (он имеет технические отклонения).

Национальные стандарты на методы механических испытаний, неразрушающего контроля и контроля межкристаллитной коррозии были гармонизированы с такими международными и европейскими стандартами:

стандарты на методы механических испытаний – с EN 10002;

EN 10045; ISO 8491; ISO 8492; ISO 8493; ISO 8494; ISO 8495;

стандарты на методы контроля межкристаллитной коррозии – с ISO 3651;

стандарты на методы неразрушающего контроля – с EN 10246.

Стандарты на трубы охватывают трубы большого диаметра для магистральных газонефтепроводов; трубы нефтяного сортамента; котель-ные; водогазопроводные; для энергомашиностроения; конструкционные бесшовные и сварные. 7 из них гармонизировано со стандартами EN, 5 – со стандартами ISO.

 ISSN 1991-7848

Анализ действующих стандартов на трубы показал, что значительная часть их требований вполне соответствует зарубежным. Однако есть и существенные отличия.

Так, например, основными отличиями требований европейских стандартов на трубы бесшовные и сварные круглого, квадратного и прямоугольного сечения (EN 10210 [8] и EN 10219 [9]) являются:

- более широкий диапазон наружных размеров труб;
- более высокая точность труб по толщине стенки;
- различная классификация марок стали в отечественных и зарубежных стандартах: марки стали, в которых массовая доля марганца до 1,6 %, кремния до 0,55 % у нас относятся к низколегированным, за рубежом – к нелегированным сталям;
- различный химический состав сталей, используемых для производства труб;
- механические свойства металла труб по зарубежным стандартам имеют следующие особенности:

более высокий уровень свойств при испытании на растяжение;

ограничение верхнего предела временного сопротивления разрыву;

нормирование предела текучести для профильных сварных труб;

для труб с толщиной стенки 5 мм и более проведение испытаний на ударный изгиб (при +20°С, 0°С,- 20°С), для труб с толщиной стенки менее 5 мм – контроль величины зерна;

- проведение неразрушающего контроля сварных швов профильных труб.

Новый модифицированный стандарт ДСТУ 4581-4:2006 (гармонизированный с ISO 9329-4:1997) на трубы бесшовные из аустенитной коррозионностойкой стали, предназначенные для сосудов, химических установок, парогенераторов и соединительных трубопроводов, содержит дополнительные требования к ранее разработанным действующим стандартам на аналогичную продукцию: ГОСТ 9940-81 [10], ГОСТ 9941-81 [11] и ГОСТ 24030-80 [12]. Сравнительный анализ требований ISO 9329-4:1997 и действующих ГОСТов на трубы из коррозионностойких сталей показал: ISO 9329-4:1997 охватывает трубы из 17 марок стали, из которых лишь одна (X6CrNiTi 18 10) полностью соответствует по химическому составу отечественной 08Х18Н10Т, четыре марки близки по химическому составу, а восемь не имеют аналогов. Кроме того, требования ISO 9329-4:1997 либо более жесткие, либо являются новыми в отечественной практике для труб из коррозионностойких марок стали. В частности регламентированы:

1%-ный предел текучести при комнатной температуре;

0,2%-ный и 1%-ный предел текучести в диапазоне температур от 150°С до 600°С (по требованию потребителя);

работа удара при комнатной температуре в продольном и поперечном направлениях на образцах с острым надрезом, и при пониженных температурах от 0°С до –195°С (по требованию потребителя);

относительное удлинение в поперечном направлении;

проведение испытаний на загиб;

проведение взамен испытания гидравлическим давлением электромагнитного контроля либо контроля внутренним давлением воздуха с применением пенообразующего средства.

Оценка потенциала трубных заводов показывает, что сегодня производители способны обеспечить выполнение до 70% зарубежных требований. Внедрение новых гармонизированных стандартов потребует определенной подготовки национального производства труб.

Выводы

Разработка и внедрение национальных стандартов Украины, гармонизированных с международными и европейскими стандартами, позволит трубным заводам изготавливать конкурентоспособную продукцию, способствовать устранению барьеров в торговле, обеспечить техническую совместимость и взаимозаменяемость продукции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Закон Украины «О стандартизации», 17 мая 2001года, № 2408-III.
2. Закон Украины «Об оценке соответствия», 17 мая 2001года, №2406-III.
3. Закон Украины «Об аккредитации органов по оценке соответствия», 17 мая 2001года, № 2407-III.
4. Закон Украины «О стандартах, технических регламентах и процедурах оценки соответствия», 01 декабря 2005года, № 3164-IY.
5. ДСТУ 1.7:2001 Национальная стандартизация. Правила и методы принятия и применения международных и региональных стандартов.
6. ДСТУ 4581-4:2006 Трубы стальные бесшовные для работы под давлением. Технические условия поставки. Часть 4: Аустенитные коррозионностойкие стали.
7. ISO 9329-4:1997 Трубы стальные бесшовные для работы под давлением. Технические условия поставки. Часть 4: Аустенитные коррозионностойкие стали.
8. EN 10210 Горячекатаные полые профили для изготовления металлоконструкций из нелегированных и мелкозернистых конструкционных сталей.
9. EN 10219 Изготовленные в холодном состоянии сварные полые профили для металлоконструкций из нелегированных и из мелкозернистых конструкционных сталей.
10. ГОСТ 9940-81 Трубы бесшовные горячедеформированные из коррозионностойкой стали. Технические условия.
11. ГОСТ 9941-81 Трубы бесшовные холодно- и теплодеформированные из коррозионностойкой стали. Технические условия.

 ISSN 1991-7848

УДК 621.774

Сокуренко В.П., Литвинский Я.И., Кучай А.В.

К ВОПРОСУ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ОЧАГА ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ЗАКАТКЕ ДНИЩ БАЛЛОНОВ

Произведен расчёт основных параметров очага деформации при закатке днищ баллонов с учётом зазора.

Виконано розрахунок основних параметрів середовища деформації при закатці днищ балонів враховуючи зазор.

The calculation of the main parameters of deformation zone while rolling up the bottoms of the balloons taking into account the gap had been carried out.

Введение

Одним из основных параметров при конструировании машин для изготовления стальных газовых баллонов способом закатки является усилие, действующее со стороны закатываемой заготовки на деформирующий инструмент – формователь. Для определения усилия необходимо расчётным путём найти величину контактной поверхности инструмента с заготовкой.

При изготовлении баллонов закатка днищ производится на предварительно нагретом конце вращающейся заготовки инструментом трения скольжения с плоской поверхностью (рис. 1). В процессе рабочего хода инструмент совершает поворот на 90^0 вокруг вертикальной оси, проходящей через точку О.

В ранее выполненных работах [1-3]расчёты параметров очага деформации при закатке днищ выполнялись без учёта зазора δ между заготовкой и инструментом, хотя наличие зазора меняет решение задачи по определению площади контактной поверхности.

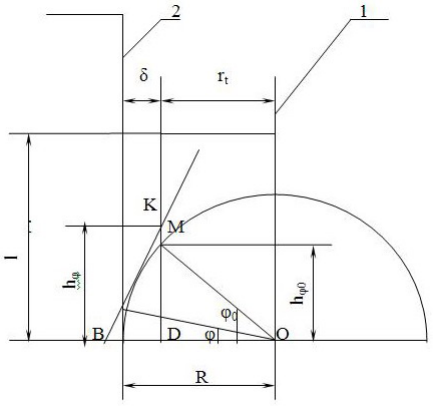


Рисунок 1 - Принципиальная схема закатки днища баллона
1- заготовка; 2-инструмент.

Весь цикл закатки днища состоит из трёх стадий. Первая стадия (при наличии зазора между инструментом и заготовкой), характери-

зуется непрерывным поступлением металла в очаг деформации и обжатием новых порций металла вместе с продолжающимся обжатием металла, уже находящегося в очаге деформации. Первая стадия заканчивается тогда, когда прекращается поступление в очаг деформации новых порций металла.

На второй стадии наиболее удалённые от торца участки заготовки, постепенно оказываясь вне зоны контакта с инструментом, приобретают форму полусферы. Наряду с этим остающаяся в зоне контакта с инструментом часть заготовки подвергается дальнейшему обжатию.

После смыкания кромок торца заготовки начинается третья стадия: окончательное формирование полусферического днища.

При расчёте контактной поверхности без учёта зазора максимальная длина очага деформации будет в начале процесса закатки при φ=0. В действительности на первой стадии процесса l изменяется от 0 до величины $l_{\varphi 0}$.

$$l_{\varphi 0}=l-h_{\varphi 0},$$

где l-вылет заготовки (длина участка заготовки, идущего на изготовление днища), $h_{\varphi 0}$-соответствующей отрезку MD на рис 1.

Из треугольника ODK найдём угол φ, при котором длина контактной поверхности будет максимальной.

$$\text{Cos } \varphi_0=r_t/R,$$

где r_t- радиус заготовки; R- поворота формователя.

$$\varphi=\arccos(rt/R), \qquad (1)$$

Длина контактной поверхности (l_φ) на первом этапе закатки определяется из условия:

$$l_\varphi=l-h_\varphi, \qquad (2)$$

где l_φ-длина контактной поверхности при заданном угле поворота формователя φ.

Из треугольника BDK

$$h_\varphi=\frac{R-r_t\cos\varphi}{\sin\varphi}, \qquad (3)$$

Для определения угла, при котором происходит касание формователя наружной образующей заготовки определим угол поворота формователя для заданной величины hφ (см рис. 1).

$$\sin\varphi=\frac{2\cdot h_\varphi\cdot R-\sqrt{4h_\varphi R^2-4(R^2-r^2)(h^2+r^2)}}{2(h^2+r^2)}$$

Подставив в полученную формулу h_φ=l найдём угол первого касания заготовки формователем.

Расчёты показывают, что для реальных случаев закатки днищ первое касание формователем заготовки происходит при угле поворота равном 1,5-2,0^0, а максимальная длина контакта соответствующей углу поворота формователя 15-20^0, т.е. практически третью часть уг-

 ISSN 1991-7848

ла поворота формователя на первом этапе происходит с увеличением длины контактной поверхности, а не с её уменьшением, как это трактуется в ряде публикаций [1-3]. Это принципиально меняет понимание о влиянии зазора между формователем и заготовкой на процесс закатки днища.

Для определения площади контактной поверхности необходимо определить ширину дуги контакта на торце заготовки [1] b_φ.

Из геометрических соотношений эта величина может быть определена из выражения

$$b_\varphi = \sqrt{r^2_{\varphi-\triangle\varphi} - r^2_\varphi}\ , \qquad (4)$$

где r_φ-радиус на торце заготовки в рассматриваемый момент времени,

$r_{\varphi-\Delta\varphi}$-радиус на торце заготовки за один оборот до рассматриваемого момента.

$$r_\varphi = R - l\varphi \cdot \sin\varphi, \qquad (5)$$

$$\Delta\varphi = 60 \cdot 90 / n \cdot \tau \qquad (6)$$

где n-частота вращения заготовки, об/мин, τ -полное время закатки, с.

На втором этапе закатки длина контактной поверхности рассчитывается по формуле

$$l_\varphi = l - h_{\varphi 0} - R(\varphi - \varphi_0), \qquad (7)$$

где $h_{\varphi 0}$- координата, при которой длина контактной поверхности будет максимальна, мм, φ_0-угол поворота при котором длина контактной поверхности будет максимальна, град.

Ширина контактной поверхности на втором этапе закатки вычисляется по формуле аналогичной формуле (4), однако r_φ находится из зависимости

$$r_\varphi = R \cdot \cos\varphi - (l - [h_{\varphi 0} + R(\varphi - \varphi_0)]\sin\varphi), \qquad (8)$$

В работах [1-2] контактная поверхность была представлена в форме треугольника либо половины эллипса. При этом рекомендовалось учитывать поправочным коэффициентом некоторое увеличение ширины контактной поверхности за счёт явления «наката» - дополнительного изгиба участков заготовки, вступающих в контакт с поверхностью инструмента.

На основании сопоставления результатов различных расчётов наиболее целесообразно определять площадь контактной поверхности S при закатке днищ баллонов из выражения

$$S = k l_\varphi b_\varphi, \qquad (9)$$

где k-поправочный коэффициент, определяемый с учётом экспериментальных данных.

ЛИТЕРАТУРА

1. В.Г. Капорович. Производство деталей из труб обкаткой М.: Машиностроение, 1978. – 136с., ил.
2. Ю.М. Матвеев, Я.М. Шехет. Исследование основных параметров процесса производства баллонов для газа. Черметинформация, 1967.-10с.

УДК 621.774.3

Тартаковский Б.И.

НОВОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА БЕСШОВНЫХ ТРУБ

Рассмотрены задачи повышения эффективности производства бесшовных труб путем внедрения нового оборудования и технологии.

Розглянуті задачі підвищення ефективності виробництва безшовних труб шляхом введення нового устаткування та технології.

The problems of obtaining the higher productivity of the seamless tube manufacturing by the way of introducing new equipment and technologies had been considered.

1. ПОДГОТОВКА ЗАГОТОВКИ

Совершенствование сталеплавильного производства и переход на непрерывную разливку требует от производителей труб унификации непрерывнолитой заготовки, организации производства и технологического процесса с использованием минимального количества типоразмеров заготовки. На ОАО "Северский ТЗ" (ТМК) освоено производство непрерывнолитой заготовки диаметром 156, 360 и 400 мм.

Заготовки диаметром 360 и 400 мм используются на собственном агрегате 14" с пильгерстаном, а заготовки диаметром 156мм поставляются на ОАО "Син.ТЗ", так же входящее в ТМК, где установлены два трубопрокатных агрегата - ТПА-140 и ТПА-80.

Заготовка диаметром 156мм используется на ТПА – 140, на ТПА-80 требуется заготовка диаметром 120мм. В связи с этим предложена и реализована технология получения заготовки диаметром 120мм из непрерывнолитой заготовки диаметром 156мм непосредственно на ТПА -80.

Перед прошивным станом устанавливается 3-х валковый обжимной стан винтовой прокатки.

Заготовка диаметром 156мм нагревается в печи, режется ножницами на 2...4шт, которые поочередно поступают на обжимной стан, где производится их обжатие до диаметра 120мм.

Далее заготовка поступает на линию ТПА-80.

Стан введен в эксплуатацию во П полугодии 2006 года.

Завод "Artrom" в Румынии, так же входящий в ТМК, имеет в своем составе два агрегата для производства бесшовных труб: ТПА-200 со станами Асселя и агрегат с реечным станом.

Для производства труб на этих агрегатах используются заготовки диаметром 120, 150, 180, 200, 220, 250мм.

© ТАРТАКОВСКИЙ Б.И., 2008

 ISSN 1991-7848

Завод имеет возможность получать дешевую непрерывнолитую заготовку только двух размеров 180 мм и 250мм.

Для получения заготовок всего ряда устанавливается обжимной стан в линии ТПА-200, так же как и на Синарском заводе перед прошивным станом. Пуск стана планируется в апреле 2008 года.

Заготовки диаметром 120...150мм получают из непрерывнолитой заготовки диаметром 180мм и заготовки диаметром 200...220мм получают из заготовки диаметром 250мм.

Таблица

Техническая характеристика обжимных станов конструкции ОАО "ЭЗТМ"

	ОАО "Син.ТЗ"	"Artrom"
Диаметр валка в пережиме, мм	590...650	620...670
Длина валка, мм	380	410
Угол подачи, град	10...18	10...18
Угол раскатки, град	12	12
Частота вращения валков, об/мин	40...120	92
Максимальное усилие прокатки, кН	700	2200
Мощность главного привода, кВт	3Ч1000	3Ч1800
Диаметр заготовки, мм	130...160	180...250
Диаметр заготовки после обжатия, мм	120	120...220
Длина заготовки, мм 1000...4000	700...2700	
Длина заготовки после обжатия, мм 1300...5760	1100...3400	

2. ЗАЦЕНТРОВКА ЗАГОТОВКИ

ОАО "ЭЗТМ" внедрил на ОАО "ВТЗ" новую конструкцию гидравлического зацентровщика, который обеспечивает точную центровку и большую глубину центровочного отверстия. Точная центровка осуществляется за счет зажима заготовки тремя цангами, которые устанавливают заготовку на ось бойка.

3. ПРОШИВНЫЕ СТАНЫ

ОАО "ЭЗТМ" разработал и внедрил новые конструкции центрователей, которые обеспечивают вышеуказанные действия со стержнем и гильзой.

В ряде случаев требуется получение гильзы с переменной толщиной стенки, в частности утонение стенки гильзы на заднем конце. Утонение заднего конца используется при последующей раскатке тонкостенных труб на агрегате с трехвалковым раскатным станом для предотвращения образования трехгранника на конце трубы.

Утонение заднего конца гильзы может быть так же использовано при последующей пилигримовой прокатке для уменьшения массы пильгерной головки.

Утонение стенки производится за счет перемещения прошивной оправки в процессе прокатки. При этом изменяется расстояние между оправкой и образующей валка на выходном конусе.

Новый прошивной стан изготовлен на ОАО "ЭЗТМ" и поставлен на ОАО "СТЗ" и пущен в первом полугодии 2007 года.

Таблица

Техническая характеристика прошивного стана ОАО "Северский ТЗ"

Диаметр заготовки, мм	360, 400
Диаметр гильзы, мм	360...450
Длина заготовки, мм	1400...4500
Длина гильзы, мм	2400...10200
Диаметр валка, мм	1350(1250)
Длина валка, мм	1300
Тип стана грибовидный	
Угол раскатки, град	12
Угол подачи, град	5...12
Частота вращения валков, об/мин	40...70(90)
Мощность главного привода, кВт	2×4000
Производительность, шт/час	90

Во II полугодии ОАО "ЭЗТМ" выполнил реконструкцию выходной стороны прошивного стана ОАО "ВТЗ".

На ТПА 200 ОАО "ВТЗ" планируется расширить сортамент выпускаемых труб в сторону увеличения длины (до 12 м) и уменьшения толщины стенки.

С этой целью во II полугодии 2007 года ОАО "ЭЗТМ" выполнил реконструкцию выходной стороны прошивного стана и раскатных станов.

Таблица

Техническая характеристика выходной стороны прошивного ТПА-200 ОАО "ВТЗ"

Прокатываемая гильза	
диаметр, мм	74...270
длина, мм	2750...9000
толщина стенки, мм	10...40
Стержень:	
диаметр, мм	57...160
длина, мм	~10260
Частота вращения гильзы, об/мин, не более	9000
Скорость гильзы, м/с	
при прокатке	0,5...1,0
при транспортировке	3...5
Ход оправки при утонении стенки, мм	50...100
Осевое усилие на стержень, кН	до 900
Утонение стенки, мм	4...8
Производительность, шт/час	до 250

 ISSN 1991-7848

4.РАСКАТНЫЕ СТАНЫ ВИНТОВОЙ ПРОКАТКИ

Трехвалковые раскатные станы

Использование трехвалковых станов позволяет получить высокоточные трубы по толщине стенки. Однако в силу особенностей процесса получение тонкостенных труб с отношением $^{D}/_{S} > 10$ затруднено из-за условий деформации заднего конца трубы.

Возможность утонения стенки гильзы на заднем конце в прошивном стане и изменение раствора валков в процессе прокатки на раскатном стане позволяют прокатывать трубы с тонкостенностью до 25мм.

ОАО "ЭЗТМ" выполнил реконструкцию раскатных станов на ТПА-200 ОАО "ВТЗ".

Валки рабочей клети имеют возможность изменения раствора в процессе прокатки.

При раскатке по старой технологии используется длинная плавающая оправка. При внедрении новой технологии может быть использована удерживаемая перемещаемая оправка.

Удерживаемая оправка перемещается в процессе раскатки с помощью упорного механизма, установленного на выходной стороне стана. Этот способ используется для производства труб длиной более 10м. На плавающей оправке длина труб ограничивается 9,5м.

Двухвалковые раскатные станы.

Для Ижорского трубного завода на ТПА-140 выполнена реконструкция обкатного стана с целью увеличения производительности и возможности деформации стенки трубы на 10...20% после автоматстана.

Деформация стенки трубы производится на цилиндрической оправке, которая перемещается в процессе прокатки, что позволяет увеличить ее стойкость при прокатке на гребневой калибровке валков.

Выводы

Перечисленные внедренные процессы и новое оборудование для их осуществления решают задачи эффективного производства бесшовных труб.

УДК 621.774.3

Тартаковский Б. И, Фадеев М. М., Меркулов Д. В.,

Чепурин М. В., Новиков М. В., Татаркин И. А.

СРАВНЕНИЕ ПРОШИВНЫХ СТАНОВ СЕВЕРСКОГО И ЧЕЛЯБИНСКОГО ТРУБНЫХ ЗАВОДОВ

Проведен сравнительный анализ действующих и проектируемых прошивных станов по параметрам циклического формоизменения. Выявлено влияние калибровки валков, углов подачи и раскатки. Показано преимущество грибовидных валков.

Проведено порівняльний аналіз діючих і тих, що проектуються прошивних станів по параметрам циклічного формозмінення. Виявлено вплив калібровки валків, кутов подачі та розкатки. Показано переваги грибоподібних валків.

The comparative analysis of the acting and being designed piercing mills after parameters of the cycling form changing had been carried out. The influence of the roll pass design, angles of feeding and rolling out had been revealed. The advantages of the tapered rolls had been demonstrated.

Введение

При современном развитии промышленности остро встает проблема получения труб большого диаметра. Одним из основных процессов получения горячекатаных труб является прошивка сплошной заготовки в черновую трубу (гильзу) на стане винтовой прокатки и дальнейший ее горячий передел.

В данной работе предпринята попытка провести сравнение действующего и проектируемого прошивных станов ОАО «ЧТПЗ» и нового действующего стана ОАО «Северский трубный завод» (ОАО «СевТЗ»). Проектируемый стан ОАО «ЧТПЗ» и стан Северского трубного завода ОАО «СевТЗ» разработаны ОАО «ЭЗТМ». Их оценка по параметрам циклического формоизменения представляет интерес.

Результаты исследований. При математическом моделировании принимали параметры из проектной документации прошивного стана ОАО «СевТЗ».

Из конструктивных особенностей прошивных станов необходимо отметить:

- Действующий прошивной стан ОАО «ЧТПЗ» имеет бочковидные валки с диаметром в пережиме 740 мм, валок имеет три конуса (рис. 1,а), пережим валка выполнен с винтовой нарезкой, валки развернуты на угол подачи 4°15′. В качестве направляющего инструмента используют ролики. Применяется оправка с «вытянутым» носиком;
- Проектируемый прошивной стан ОАО «ЧТПЗ» имеет бочковидные валки с диаметром в пережиме 1200 мм, валок имеет три конуса

© ТАРТАКОВСКИЙ Б. И, ФАДЕЕВ М. М., МЕРКУЛОВ Д. В., ЧЕПУРИН М. В., НОВИКОВ М. В., ТАТАРКИН И. А., 2008

 ISSN 1991-7848

(рис. 1,б), пережим валка выполнен с винтовой нарезкой, валки могут разворачиваться на угол подачи 0-10°, в качестве рабочего угла подачи принимали 8°. В качестве направляющего инструмента предполагается использование линеек. Используется оправка со сферической рабочей частью [1];

- Действующий прошивной ОАО «СевТЗ» имеет грибовидные двухконусные валки (угол раскатки 12°) с диаметром в пережиме 1300 мм (рис. 1,в). Валки могут разворачиваться на угол подачи 0-10°, в качестве рабочего угла подачи принимали 8°. В качестве направляющего инструмента используют линейки. Используется оправка со сферической рабочей частью [1].

Для сравнения рассматривалось получение гильзы 425×85 мм из заготовки 430 мм. Число оборотов валков было принято равным 50 об/с, обжатия в пережиме и перед носком оправки принимали 10 и 6% соответственно.

При моделировании на математической модели [2] для оценки влияния различных углов подачи и раскатки, были проведены расчеты для сравнения станов в сопоставимых условиях (таблица).

Таблица

Параметры циклического формоизменения

Прошивной стан	Угол подачи, град	Угол раскатки, град	Длина очага деформации, мм	Число циклов до точек			Шаг подачи, мм			Накопленная степень деформации Λ_Σ		
				B	*C*	*F*	*B*	*C*	*F*	*B*	*C*	*F*
ЧТПЗ (Д)	4,25	0	545	8,3	12,4	18,3	23,7	24,1	36.2	2.3	7,2	11,1
ЧТПЗ (Д)	8.0	0	509	4,1	6,1	9,1	50	51	71	1,1	7,1	10,7
ЧТПЗ (П)	4,25	0	645	8,6	14	22	25,4	33,1	35,3	2,4	7,5	11,22
ЧТПЗ*	8.0	0	603	4,1	7,2	11,1	47,1	57,1	67.1	1,89	7,5	11,2
ЧТПЗ (П)	8.0	0	619	4,1	7,4	11,4	46,5	61,9	67,8	2,0	7.1	10,4
ЧТПЗ**	8.0	0	631	4,48	7,5	11,5	46,1	58	67,7	2,2	6,9	10,2
ЧТПЗ (П)	8.0	12	652	8,7	7,5	11,6	47,3	62,3	69,9	2,2	7,4	11,1
Северский	4,25	0	646	7,3	13	21,4	24,9	32,7	34,2	1,34	9,0	12,1
Северский	8	0	623	4,3	7,1	11,7	45,5	60,8	66,7	0,9	7,53	10,8
Северский	8	12	654	8,4	7,4	11,8	47,4	61,3	68,1	0,93	7,7	11,4

* – действующий прошивной стан ОАО «ЧТПЗ», с уменьшенным до 740мм диаметром валков;

** - действующий прошивной стан ОАО «ЧТПЗ», с увеличенным до 1300 мм диаметром валков.

Математическая модель [2] позволяет рассматривать взаимное расположение инструмента (валков, оправки, направляющего инст-

румента) и заготовки-гильзы в трехмерном пространстве, оценивать процесс движения заготовки-гильзы по винтовой линии и рассчитывать единичные деформации и накопленные по итогу к данной точке параметры циклического формоизменения.

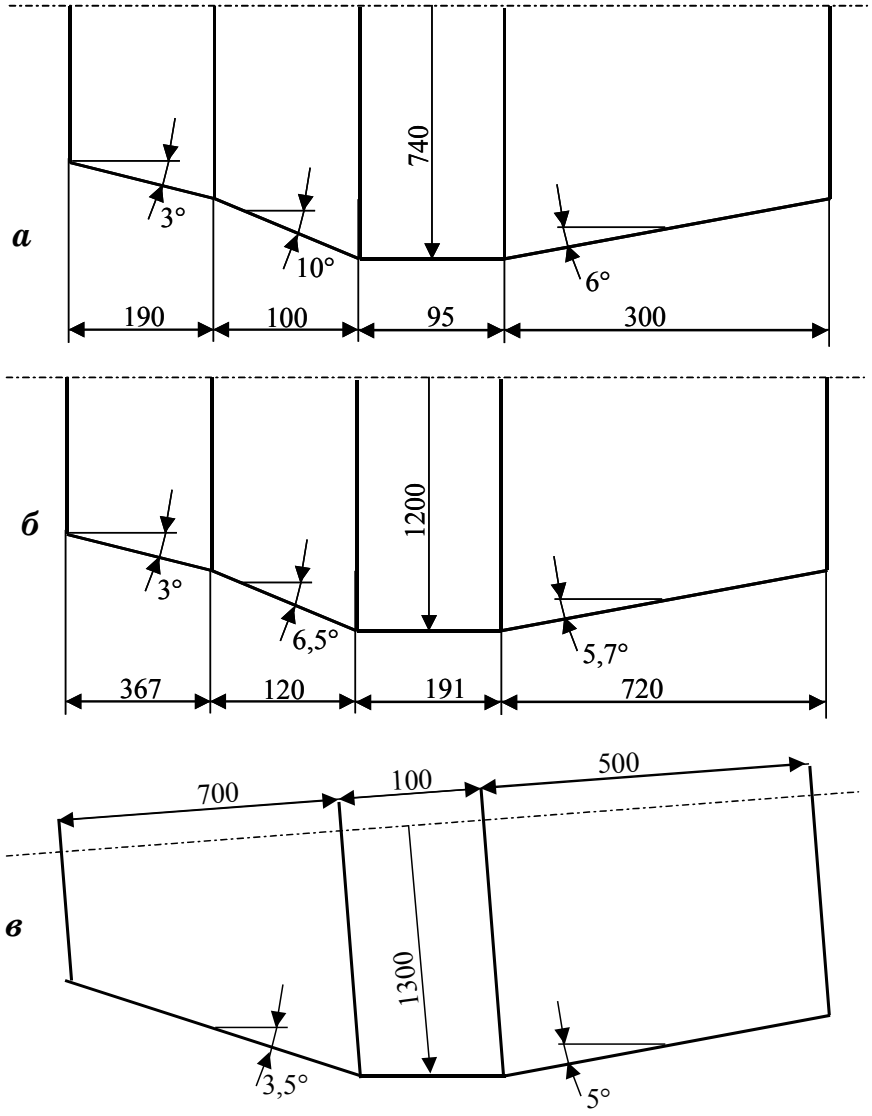


Рисунок - Валки прошивных станов

а – действующего прошивного стана ОАО «ЧТПЗ»; б – проектируемого прошивного стана ОАО «ЧТПЗ»; прошивного стана Северского трубного завода

По данным расчетом (см. таблицу) до носка оправки (***B***), в пережиме (***C***) и на выходе из очага деформации (***F***), на малом угле подачи (4°15′) число циклов и накопленная степень деформации сдвига в целом больше, чем при угле 8°. Полученная зависимость объясняется характером накопления в зависимости от числа циклов и геометрических характеристик очагов деформации.

 ISSN 1991-7848

При наличии угла раскатки уменьшается накопленная степень деформации сдвига до носка оправки, что снижает вероятность возникновения плен перед носком оправки. Число шагов и накопленная степень деформации сдвига в пережиме и на выходе из очага деформации – увеличиваются, что положительно сказывается на проработке литой структуры при прошивке непрерывнолитых заготовок. Данная зависимость хорошо подтверждается ранее проведенными исследованиями [3, 4] и практическими рекомендациями ОАО «ЭЗТМ».

Зависимость параметров циклического формоизменения от диаметра валков не прослеживается, что объясняется разной калибровкой валков рассматриваемых станов. Необходимо отметить, что на прошивном стане Северского трубного завода, проработка структуры (при прочих равных) выше – что косвенно доказывает правильность предложенных ОАО «ЭЗТМ» рекомендаций при проектировании прошивного стана.

Моделирование прошивки в валках одинаковой калибровки, но имеющих разный диаметр в пережиме (см. таблица), показывает, что увеличение диаметра валка уменьшает накопленную степень деформации сдвига. Такой характер поведения связан с изменением профиля валка в трехмерном пространстве при контакте с заготовкой.

Выводы

Проведено сравнение прошивных станов ОАО «Северский трубный завод» и ОАО «Челябинский трубный завод» различного конструктивного исполнения по параметрам циклического деформирования. Выявлено влияние калибровки валков, углов подачи и раскатки.

Показано преимущество прошивных станов с грибовидными валками при прошивке непрерывнолитых заготовок для получения труб из углеродистых сталей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Данилов Ф. А., Глейберг А. З., Балакин В. Г. Производство стальных труб горячей прокаткой. –М.: Металлургиздат, 1954. – 597 с.
2. Golubchik R. M., Lebedev A. V. New methods piercing mills setting relaring to the cyclic forming of hollows. History and future of seemless steel tubes (7-th International Conference)/ Karlovy Vary, 1990, November, p. 1/8 – 117.
3. Меркулов Д. В., Голубчик Р. М., Чепурин М. В. Особенности прошивки заготовок в косовалковых станах разного конструктивного исполнения. Труды IV международного конгресса прокатчиков, т. 2 (Магнитогорск 19-23 октября). –М.: АО «Черметинформация», 2002, с. 82-87.
4. Чикалов С. Г., Меркулов Д. В., Новиков М.В., Чепурин М.В. Оценка перспективности прошивных станов разных конструкций. Сталь, 2004, №3, с. 44-46.

УДК 621.774.36

Угрюмов Ю.Д., Дрожжа П.В., Губинский А.В., Потемкин О.В., Угрюмов Д.Ю.

ПУТИ СНИЖЕНИЯ РАСХОДА МЕТАЛЛА НА ПИЛИГРИМОВЫХ ТРУБОПРОКАТНЫХ УСТАНОВКАХ

Розглянуто основні шляхи зниження витрат металу при пілігримовій прокатці труб, наведено нові технічні рішення, які забезпечують зниження витрат металу і підвищення ефективності роботи установок.

Рассмотрены основные пути снижения расхода металла при пилигримовой прокатке труб. приведены новые технические решения, обеспечивающие снижение расхода металла и повышение эффективности работы установок.

The base paths of lowering of expenditure of metal are considered at pilgering tube rolling. The new engineering decisions providing lowering of expenditure of metal and a heightening of an overall performance of settings are reduced.

Процесс производства труб на пилигимовых установках характерен как бесспорными преимуществами, о чем свительствует то, что в мире сейчас работает более 30 таких установок, так и недостатками, из которых, прежде всего, можно выделить повышенный расход металла в обрезь и повышенную разностенность труб, снижающую их точность.

Актуальность проблемы снижения расхода металла при прокатке труб на пилигримовых установках значительно возросла, что обусловлено увеличением потерь металла в связи с повышенными требованиями к качеству производимых труб по зарубежным стандартам API5L, API5CT, DIN и других, а также возросло количество производимых мерных труб. Вопросам снижения расхода металла на пилигримовых установках посвящено значительное количество работ, из которых, опубликованных в последние годы, можно отметить следующие [1-5].

В настоящей работе остановимся на основных направлениях снижения расхода металла на пилигримовых установках, используя технические решения, разработанные в НМетАУ и ОАО "Интерпайп НТЗ".

Улучшение качества исходной заготовки. Известно, что основным недостатком стационарных слитков мартеновского производства является наличие усадочной раковины с повышенной загрязненностью металла ликвациями неметаллическими включениями. Теплоизолирующие засыпки на зеркало металла во время разливки несколько повышают его чистоту и пластичность в осевой зоне. Однако образование открытой усадочной раковины с неровными краями не способствует уменьшению количества дефектов на внутренней поверхности труб.

© УГРЮМОВ Ю.Д., ДРОЖЖА П.В., ГУБИНСКИЙ А.В., ПОТЕМКИН О.В., УГРЮМОВ Д.Ю., 2008.

 ISSN 1991-7848

Основным резервом улучшения качества исходной заготовки для производства труб на пилигримовых установках, кроме приведенного выше, является использование непрерывно литой заготовки, что позволит экономить 16-20 % металла. Анализ качества труб из полой и сплошной непрерывно литой заготовки, проведенный д.т.н. В.В. Березовским показал, что сплошная заготовка имеет преимущества в части лучшей макроструктуры, отсутствия зоны стыка фронтов кристаллизации, более высоких механических свойств.

Снижение технологической обрези. Высокий расходный коэффициент металла при прокатке труб нефтяного сортамента обусловлен наличием технологических отходов - затравки и пильгерголовки, которые составляют 8-10 % массы исходного слитка, при этом в затравку уходит обычно 3-4 %, а в пильгерголовку - 5-6 % (рис.1).

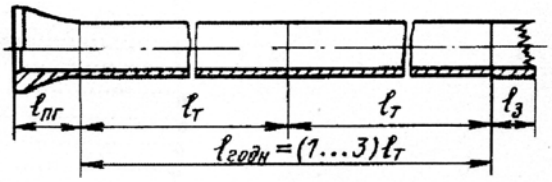


Рисунок 1 - Вид плети после прокатки на пилигримов ом стане: $l_т$ – мерная часть трубы; $l_{пг}$ – длина пилигримов ой головки; $l_з$ – длина заправочного конца

На величину обрези затравочного конца трубы влияет много факторов, приведенных в работе [1]. Кардинальным решением проблемы снижения обрези затравочного конца и длительности процесса затравки является предварительная подготовка переднего конца гильзы перед пильгерованием. Возможные формы подготовленного конца гильзы приведены на рис.2, где $ln_1 = ln_г$, $ln_2 = ln_3 = 0{,}5\ ln_г$, $ln_4 = ln'_4 + ln''_4 = ln_г$, $ln_5 = ln_г$. Реальные формы концов гильзы приведены на рис. 1б и 1в, которые могут быть использованы для прокатки относительно тонкостенных труб (S<18 мм). Формы концов гильз на рис.1г и 1д соответствуют прокатке трубе S>18мм. Впервые в СССР целесообразность подготовки передних концов гильз перед пильгерованием была обоснована к.т.н. А.А. Чернявским.

Среди известных способов подготовки передних концов гильз наиболее целесообразным представлялся способ заострения в холостых валках на прошивном косовалковом стане в процессе прошивки [6]. Этот способ был исследован и испытан в лабораторных и промышленных условиях. Полученные результаты исследований и накопленный опыт эксплуатации нового оборудования для заострения гильз в процессе прошивки (элонгирования) позволяют сделать следующие выводы о перспективах его использования.

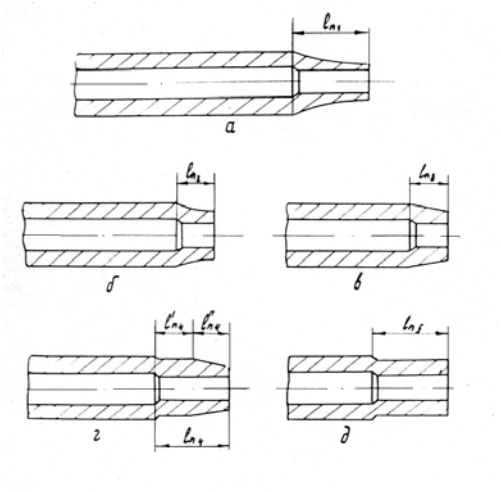


Рисунок 2 - Форма подготовленных передних концов гильз

Проведенные исследования подтвердили высокую эффективность применения гильз с подготовленным передним концом при прокатке тонкостенных труб на пилигримов ом стане, что позволяет получить прирост производства 2-4 %.

Подготовка конца гильзы на прошивном стане в процессе прошивки целесообразно в случае, когда стержень оправки является дорном пильгерстана. Кроме того, холостые валки обкатного устройства могут калибровать передний конец гильзы, а также стабилизировать наружный диаметр гильзы по длине, что облегчает условия зарядки дорна.

Подготовка передних концов гильз на ряде зарубежных пилигримовых установках осуществляется путем обжатия гильзы на дорне матрицами. При этом достигается лишь посадка конца гильзы на дорн без обжатия ее стенки. Эта технология незначительно влияет на снижение расхода металла на затравку. Основным фактором здесь является увеличение сцепления гильзы с дорном в процессе пильгерования для некоторого повышения числа оборотов валков пильгерстана.

Наличие пильгерголовки обусловлено спецификой формирования профиля раската, а величина ее диктуется, с одной стороны, необходимостью снятия трубы с дорна после прокатки шиберным устройством, а с другой – качеством металла пильгерголовки, соответствующего головной части слитка, характерной низким качеством [1].

Проблема максимального уменьшения массы пильгерголовки может решаться в следующих направлениях. Первое направление связано с неполной раскаткой пильгерголовки, когда на торце остается толщина раската не менее 14 мм, что позволит снять трубу с дорна шиберным устройством. Второе направление связано с использованием нового оборудования для фиксации трубы при полностью раскатанной пильгерголовке,

 ISSN 1991-7848

например, обжатие конца трубы профилированными матрицами [2, 3, 5]. Третье направление связано с неполной раскаткой пильгерголовки для снятия трубы шиберным устройством, а полную раскатку трубы по всей длине осуществляют на раскатных косовалковых станах на короткой оправке [7].

Одним из направлений уменьшения массы пильгерголовки является применение хвостовиков дорна с увеличенным наружным диаметром и выполненных из сопряженных конических и цилиндрических участков. Экономия объема массы пильгерголовки (участок 8) достигается за счет разницы диаметров цилиндрического и ступенчатого хвостовиков дорна.

Поэтому основным направлением снижения обрези при раскрое мерных труб является стабилизация массы применяемых слитков в соответствии с заказом, что может быть осуществлено обрезью головной части слитка, комплексным утеплением этой части слитка, взвешиванием гильзы перед пильгерованием, совершенствованием организации раскроя за пилигримовым станом, применением непрерывнолитой заготовки.

Повышение точности труб. Трубы после пилигримовой прокатки имеют значительный разброс по толщине стенки, который обусловлен калибровкой и износом инструмента, колебаниями исходной температуры гильз, изменением температуры в процессе прокатки вследствие его продолжительности (до 200 с), отклонениями угла кантовки гильзы от 90° и другими факторами.

Разброс средней толщины стенки труб на пилигримовом стане в суммарном поле рассеяния составляет 25...30 %, причем доля продольной составляющей равна 20...25 %, а поперечной – 45...50 %.

Основными путями повышения точности труб по толщине стенки являются: использование поля суженных или минусовых допусков при пильгеровании и применение систем автоматического регулирования толщины стенки трубы в процессе прокатки.

Наибольшего эффекта прокатка на «минус» достигает тогда, когда трубы прокатывают с минусовыми допусками, а сдают по теоретической массе, что дает дополнительный прирост производства и снижает тем самым расход металла. Использование поля минусовых допусков во много раз выгоднее любых других мероприятий по увеличению производительности стана, так как затраты на металл в себестоимости труб достигают 80-85 %.

Анализ стандартов (ГОСТ 8731/8732; ГОСТ 632, API5CT, API5L) в части регламентируемых допусков по толщине стенки труб показывает, что только ГОСТ 8731/8732 допускает превышение минусовых допусков над плюсовыми и таким образом стимулирует прокатку на «минус». Во всех других случаях реально лишь рассматривать возможность сужения

поля плюсовых и минусовых допусков до ± 10 % по толщине стенки.

Прокатка на «минус» обсадных труб часто затруднена или вообще невозможна из-за ограничений накладываемых качеством нарезки резьбы на концах труб.

Для повышения точности труб путем снижения разностенности необходимо регулировать процесс пилигримовой прокатки.

Основными факторами стабилизации поперечной разностенности являются: равномерный нагрев гильз, тщательная настройка пилигримового стана включая настройку валков и оси прокатки с осью подающего аппарата, применение рациональной калибровки прокатного инструмента и др.

Необходимо отметить, что уменьшение поперечной разностенности путем регулирования процесса пилигримовой прокатки затруднительно. Единственным параметром пригодным для управления поперечной разностенностью является величина подачи металла в валки.

На продольную разностенность в основном влияют диаметр дорна ($d_д$), температура гильзы ($T_г$) и раствор валков (h) пилигримового стана. Проведенные нами теоретические и экспериментальные исследования позволили предложить рациональную схему адаптивного управления толщиной стенки труб на пильгерстане на базе математической модели формирования средней толщины стенки трубы в виде полинома первой степени [8].

Применение второго горячего передела труб. Особенности процесса деформации металла на пилигримовом стане, характеризующиеся повышенной продольной и поперечной разностенностью, а также наличием «бугров» вследствие нераскатанных объемов подач, позволяют признать его заготовочным, т.е. раскат после пильгерования должен подвергаться второму горячему переделу по диаметру и стенке. Существуют предложения по осуществлению этого передела: на непрерывном стане, риллингах, автоматическом стане, трехвалковом раскатном стане и др. При этом на пильгерстане прокатывают раскат с толщиной стенки на 20-35 % больше с последующей ее раскаткой на оправке за пильгерстаном. При этом может быть повышена производительность (до 70%) пильгерстана за счет увеличения подачи и повышена точность труб по толщине стенки за счет раскатки бугров и снижения разностенности. Использование в качестве второго горячего передела раскатного косовалкового стана с линейками на короткой оправке позволит кардинально решить проблему уменьшения массы затравки и пильгеровки, о чем было сказано выше [7].

Один из вариантов второго горячего передела - это раскатка труб на универсальном стане продольной прокатки на удерживаемой оправке, что может быть реализовано на пятиклетевом калибровочном стане ТПА 5-12" ОАО «Интерпайп НТЗ». Поэтому применение второго горячего передела

 ISSN 1991-7848

следует признать одним из основных направлений совершенствования пилигримовой прокатки по всем показателям, как производительности установки, так и точности труб и минимального расхода металла.

Калибровка концов труб. Для решения проблемы производства обсадных труб на «минус» по толщине стенки, о чем говорилось выше, с одновременным удовлетворением требований стандартов по минимально допустимой толщине стенки под резьбой применяется предварительная подготовка концов труб, заключающаяся в калибровке их на конус.

В этом случае указанное ограничение по стенке под резьбой не является лимитирующим фактором для прокатки труб в минусовых допусках по толщине стенки. Нарезка конической резьбы на предварительно скалиброванных на конус концах обсадных труб привела к созданию нового типа резьбового соединения, разработанного на кафедре ОМД НМетАУ совместно с ВНИИТнефть и ОАО «НТЗ» [9].

В НМетАУ разработана технология [10,11] калибровки концов обсадных труб под нарезку с помощью обкатных машин, реализующих различные схемы деформации: с посадкой наружного диаметра трубы на конус и с раздачей конца трубы по внутреннему диаметру с последующей посадкой на конус по наружному диаметру.

На базе исследований НМетАУ объединением «Электростальтяжмаш» разработано оборудование для калибровки концов обсадных труб в два этапа. Оборудование установлено по проекту Укргипромеза в ТПЦ4 ОАО «НТЗ». На первом этапе трубы подвергаются внутренней раскатке роликовым инструментом (рис. 3), в результате чего наружный диаметр увеличивается на 0,5-1,0 мм.

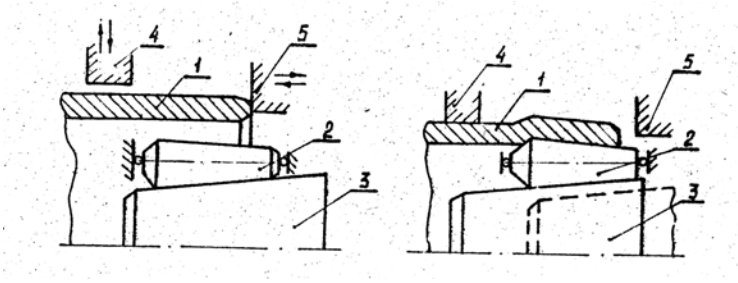


Рисунок 3 - Схема внутренней раскатки концов труб: 1 – труба; 2 - деформирующий ролик; 3 -опорный ролик; 4 – зажим; 5 - упор

На втором этапе конец трубы калибруют по наружному диаметру методом редуцирования роликовым инструментом до получения требуемого профиля (рис. 4). Операции раскатки и редуцирования выполняют последовательно на специальных обкатных машинах - внутренней (МВК) и наружной (МНК) калибровки.

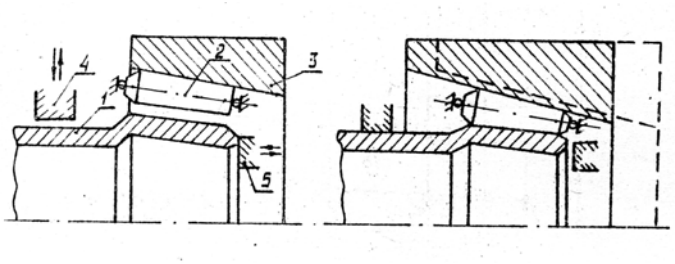


Рисунок 4 - Схема наружной калибровки концов труб: 1 – труба; 2 – деформирующий ролик; 3 – траверса с конусной втулкой; 4 – зажим; 5 - упор

В связи с возросшими требованиями к качеству обсадных труб и существующей проблемы повышенного в связи с этим расхода металла, считаем целесообразным вернуться к вопросу внедрения технологии калибровки концов труб на машинах МВК и МНК в ТПЦ4 ОАО «НТЗ».

ВЫВОДЫ

Проанализированы основные пути снижения расхода металла на пилигримовых трубопрокатных установках: улучшение качества исходной заготовки, снижение технологической обрези в затравку и пильгерголовку, снижение обрези при раскрое мерных труб, повышение точности труб, применение второго горячего передела труб за пильгерстаном, калибрование концов обсадных труб под нарезку. Приведены конкретные технические решения, позволяющие решать поставленные проблемы.

ЛИТЕРАТУРА

1. А.А. Чернявский, В.В. Березовский, Ю.Д. Угрюмов. Экономия металла при производстве труб нефтяного сортамента. М.: Металлургия. 1987. - 304 с.

2. В.В. Березовский, Ю.Д. Угрюмов, Д.Ю. Угрюмов. Черная металлургия. Бюллетень научн. Техн. Инф. Приложение 7, 2003, - 15 с.

3. В.В. Березовский, Ю.Д. Угрюмов, Д.Ю. Угрюмов. Металлургическая и горнорудная промышленность, 2003, № 3, с. 59-64.

4.Ю.Д. Угрюмов, А.В. Губинский, Д.Ю. Угрюмов. Сучасні проблеми металургії, т.8, 2005, с.477-484.

5. В.А. Постный, Д.Ю. Угрюмов, А.В. Губинский, Д.Ю. Угрюмов. Сучасні проблеми металургії, т.8, 2005, с.470-474.

6. А.с. 169049(СССР.), 1965

7. О.А. Пляцковский, Ю.Д. Угрюмов, В.М. Статников и др./ Металлургическая и горнорудная промышленность, 1982, № 1, с. 19-20.

8. Д.Ю. Угрюмов. Металл и литье Украины, № 12, 2003. с. 39-41.

9. А.с. 837517(СССР.) , 1981.

10. В.В. Перчаник, А.В. Губинский, В.И. Плохой и др. Сталь. № 11, 1988, с. 85-87.

11. В.М. Друян. В.В. Перчаник. А.В. Губинский и др. Исследование и совершенствование процессов производства труб и профилей». Межвузовский сб. научн. трудов. М., ВЗМИ. 1986. с. 29-38

 ISSN 1991-7848

УДК 621.774

А. А. Чуев

К ОПРЕДЕЛЕНИЮ РАЗНОСТЕННОСТИ КОНЦОВ ГИЛЬЗ

Решена задача определения параметров профиля и объема сферической части оправок для использования в программах оценки точности гильз.

Розв’язана задача визначення параметрів профілю та об’єму сферичної частини оправок для використання в програмах оцінки точності гільз.

The problem of determination of the shape parameters and the volume of the spherical part of mandrels had been solved for use in the programs of evaluating the shell precision.

Разностенность концов гильз, определяя величину технологической обрези, является существенным фактором, учет которого необходим при технологических расчетах и решении задач планирования с использованием модели технологического процесса прокатки.

Модель технологического процесса может использовать как расчетные, так и выбираемые из баз данных параметры. В случаях существенного влияния технологических факторов на величину используемых моделями параметров, более предпочтительным является использование величин, определяемых расчетом.

Использование параметров очага деформации прошивного стана для оценки длины концевых участков гильзы с повышенной разностенностью предполагает, наряду с учетом наружных размеров очага, определение размеров и текущих координат его внутренней полости.

При расчете текущих координат поверхности оправок, наряду с длиной участков рабочей поверхности и конусностью калибрующего участка, используется радиус сферической части рабочей поверхности оправки.

Величина радиуса сферической части оправок обеспечивает сопряжение конической поверхности калибрующего участка с носком оправки. И для программ станков с ЧПУ, обрабатывающих поверхность оправок, и при расчетах параметров очага деформации требуется точная величина этого радиуса, в то же время на чертежах, данные которых используются программным обеспечением для технологических расчетов, оправки объединены в размерные группы с одним радиусом.

Для исключения сбоев автоматических расчетов необходимо учитывать отклонения чертежных размеров от идеальных.

Поскольку для определения текущих координат сферической части оправки используются формулы, учитывающие расположение

© А. А. ЧУЕВ, 2008

центра вращения, описывающего радиуса, см. схему на рис.1. то в задачу формирования точных координат входит их расчет.

Точное значение радиуса, обеспечивающего сопряжение поверхностей калибрующего участка и носка оправки, определяется по известной формуле (1) [1, 2] .

$$\rho = \frac{\left(\delta''_{П} - \delta'_{П}\right)^2 + 4L^2}{4\left[\left(\delta''_{П} - \delta'_{П}\right)\cos\alpha \ - 2L\sin\alpha\ \right]} \qquad (1)$$

где:

$\delta''_{П} = 2 \cdot r_k$ - максимальный диаметр физического участка оправки (см. рис.2)

$\delta'_{П} = 2 \cdot r_H$ - диаметр носка оправки

При применении в расчетах этой величины радиуса, координаты его центра вращения определяются как:

$$X_0 = \rho \cdot \sin\alpha \qquad (2)$$

$$Y_0 = \rho\cos\alpha \qquad (3)$$

В случае применения для расчетов округленных чертежных размеров оправок формулы (2) и (3) применять нельзя, так как они дают разрыв сопряжения и разрыв расчетной функции, что вызывает сбой в расчете.

Для случая применения в расчетах параметров оправок, радиус сферической части которых задан и отличается от рассчитанного по формуле (1) предлагается использовать методику получения координат центра вращения радиуса при заданной его величине:

Согласно схеме рис. 1

$$Y_0 = \sqrt{\rho^2 - \left(l + X_0\right)^2}$$

$$X_0 = \sqrt{\rho^2 \left(Y_0 + h\right)^2}$$

Решим систему этих уравнений

После подстановки Y_0 в X_0 и преобразования получаем квадратное уравнение вида

$$aX_0^{\ 2} + bX_0 + c = 0$$

Откуда X_0 равно:

$$X_0 = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

где

$$a = 4\left(l^2 + h^2\right)$$

 ISSN 1991-7848

$$b = 4\left(l^3 + l \cdot h^2\right)$$
$$c = l^4 + h^4 + 2l^2 \cdot h^2 - 4h^2\rho^2$$

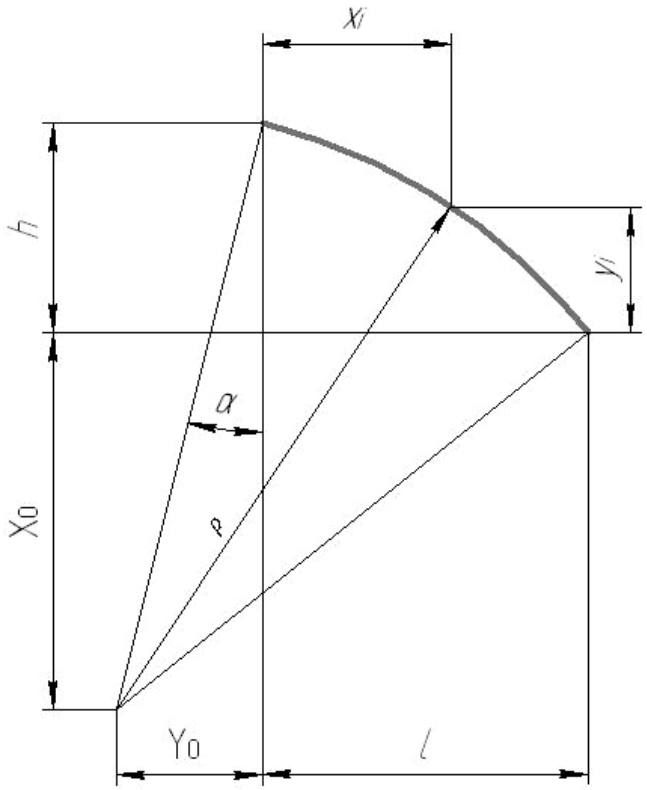


Рисунок 1 – К расчету профиля сферической части оправки прошивного стана

Величину Y_0 находим из выражения, подставив значение X_0:

$$Y_0 = \sqrt{\rho^2 - \left(l + X_0\right)^2}$$

Угол сопряжения сферы с конусной поверхностью, который в дальнейшем должен использоваться вместо конусности калибрующего участка в расчетах текущих координат профиля оправки:

$$\alpha = \arcsin\frac{X_0}{\rho}$$

* * *

При определении объема металла участков гильз с повышенной разностенностью важным является расчет объема сферической части оправки прошивного стана.

Для вывода формулы определения объема сферической части оправки используем схему, показанную на рис.2.

Уравнением контура сферической поверхности оправки является:

$$y = \sqrt{\rho^2 - (N + x)^2} - M$$

где:

$$N = \rho \cdot \sin\alpha$$

$$M = \rho \cdot \cos\alpha - r_k$$

$$r_k = \frac{D_0 - 2L_k \cdot tg\alpha}{2}$$

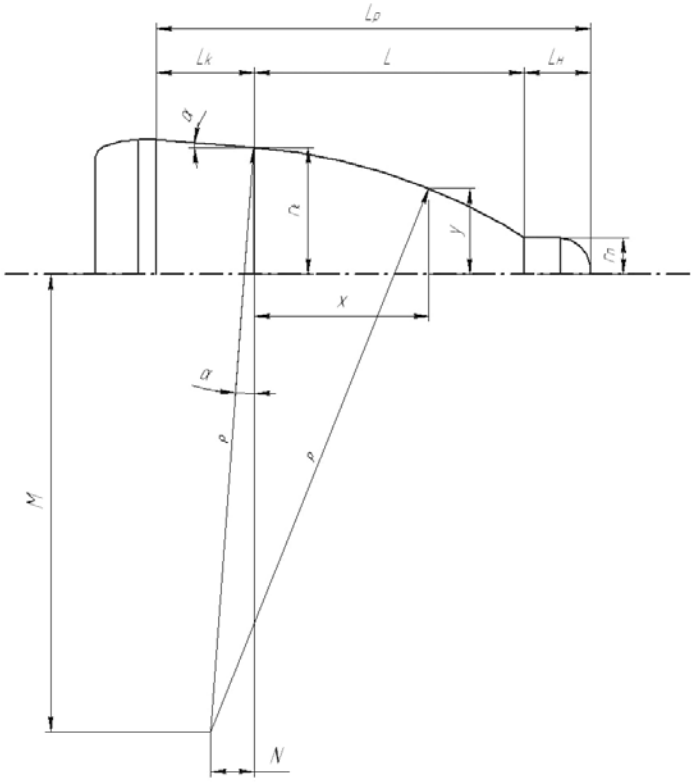


Рисунок 2 – Профиль оправки прошивного стана

Объем сферической части оправки:

$$V = \pi \int_0^L y^2 dx = \pi \int_0^L \left(\sqrt{\rho^2 - (N + x)^2} - M \right)^2 dx$$

где:

$$L = L_p - L_k - L_H$$

Преобразуем подинтегральное выражение:

$$\pi \int_0^L (\sqrt{\rho^2 - (N + x)^2} - M)^2 dx = \pi \int \left(\rho^2 - (N + x)^2 - 2M\sqrt{\rho^2 - (N + x)^2} + M^2 \right) dx =$$

$$= \pi \int_0^L \left(\rho^2 - N^2 - 2Nx - x^2 + M^2 - 2M\sqrt{\rho^2 - (N + x)^2} \right) dx =$$

$$= \pi \left(\left(\rho^2 - N^2 + M^2 \right) \int_0^L dx - 2N \int_0^L x dx - \int_0^L x^2 dx - 2M \int \left(\sqrt{\rho^2 - (N + x)^2} \right) dx \right)$$

 ISSN 1991-7848

Последний интеграл при замене $N+x=X$ превращается в интеграл вида $\int\sqrt{a^2-x^2}dx$, который решается с помощью подстановки $t=\arcsin\frac{x}{a}$ (Фихтингольц Г.М., Курс дифференциального и интегрального исчисления, стр.26) и равен:

$$\frac{1}{2}X\cdot\sqrt{a^2-X^2}+\frac{a^2}{2}\cdot\arcsin\frac{X}{a}+c.$$

В нашем случае после подстановки $X=N+x$ он равен:

$$\frac{1}{2}(N+x)\cdot\sqrt{\rho^2-(N+x)^2}+\frac{\rho^2}{2}\cdot\arcsin\frac{(N+x)}{\rho}+c$$

Отсюда:

$$V=\pi\left(\left(\rho^2-N^2+M^2\right)x\Big|_0^L-Nx^2\Big|_0^L-\frac{x^3}{3}\Big|_0^L-2M\left(\frac{1}{2}(N+x)\cdot\sqrt{\rho^2-(N+x)^2}+\frac{\rho^2}{2}\cdot\arcsin\frac{(N+x)}{\rho}\right)\Big|_0^L\right)=$$

$$=\pi\left[\left(\rho^2+M^2-N^2\right)\cdot L-0-NL^2+0-\frac{L^3}{3}+0-2M\left(\frac{1}{2}(N+L)\sqrt{\rho^2-(N+L)^2}+\frac{\rho^2}{2}\arcsin\frac{(N+L)}{\rho}-\right.\right.$$

$$\left.\left.-\frac{1}{2}N\cdot\sqrt{\rho^2-N^2}-\frac{\rho^2}{2}\arcsin\frac{N}{\rho}\right)\right]$$

Окончательно объем сферической части оправки любой длины L начиная с X=0 в соответствии со схемой на рис. 2 равен:

$$Vc=\pi\left(\left(\rho^2+M^2-N^2\right)\cdot L-NL^2-\frac{L^3}{3}-2M\left(\frac{1}{2}(N+L)\cdot\sqrt{\rho^2-(N+L)^2}+\frac{\rho^2}{2}\arcsin\frac{(N+L)}{\rho}-\right.\right.$$

$$\left.\left.-\frac{1}{2}N\sqrt{\rho^2-N^2}-\frac{\rho^2}{2}\arcsin\frac{N}{\rho}\right)\right).$$

Выводы

Таким образом получены формулы профиля и объема сферической части оправок прошивного стана, пригодные для использования в компьютерных программах оценки точности гильз и решения задач, связанных с определением объема сферических участков тел вращения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Горячая прокатка труб - Данилов Ф.Л., Глейберг А. З., Балакин В. Г. М. Металлургиздат, 1962 – 591 с.;
2. Технология трубного производства / В.Н. Данченко, А.П. Коликов, Б.А. Романцев, С.В. Самусев. – М.: “Интермет Инжиниринг”, 2002. – 638 с.

УДК 621.77

Шифрин Е.И.

СОСТОЯНИЕ И ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ТРУБНОГО ПРОИЗВОДСТВА РОССИИ

Последние годы для производителей труб России были характерны постоянно возрастающим спросом рынка на трубную продукцию. Причем, потребление труб росло не только за счет традиционного роста спроса в нефтегазовой сфере. Промышленные предприятия общего машиностроения, автопрома, сельхозмашиностроения, энергетики и строительства также демонстрировали устойчивый рост потребительского спроса. По оценкам специалистов потребление труб на внутреннем рынке России по итогам 2006 года выросло на 24,5%, а в 2007 году в сравнении с 2006 годом увеличилось на 14,4%. Прогнозируется, что внутреннее потребление стальных труб в 2010 году превысит 10,5 миллионов тонн.

Наряду с этим, продолжающееся укрепление рубля оказывает негативное влияние на экспорт, объем которого уменьшился в 2007году к уровню предыдущего год на 6,7 % и инициировало рост закупок по импорту.

Крупные трубные предприятия РФ увеличили производство в 2007 году на 14,4 %. В наибольшей мере это достигли: ВМЗ (+53 %) и ЧТПЗ (+24,7 %), которые продолжали масштабные поставки тяжеловесных труб большого диаметра для строительства нефте- и газопроводов и для ремонтных нужд Газпрома и Транснефти. В первом квартале 2008 года основные тенденции, характерные для 2007 года сохранились.

Сохранили высокие темпы роста производства также малые заводы (+21 %), что было обусловлено ростом потребности в сварных трубах малого диаметра в строительном комплексе и для реализации национальных проектов по жилью и газификации регионов.

На фоне высоких отраслевых показателей производство ТМК в 2007 году выросло незначительно – на 2,5 % и было обеспечено, в основном, ОАО «ТАГМЕТ» (+9,4%) и ОАО «СТЗ» (+8,2%). В 2008 году показатели роста производства несколько снизились из-за остановки в октябре 2007 года ТПЦ № 2 ОАО «Тагмет» на реконструкцию.

Невысокие темпы роста объемных показателей на предприятиях ТМК объясняются достигнутой практически полной загрузкой имею-

 ISSN 1991-7848

щихся производственных мощностей, а также вводом в эксплуатацию новых мощностей по производству прямошовных труб большого диаметра на ВМЗ, из-за чего упала потребность в спиральношовных трубах ВТЗ. Дальнейшее увеличение роста производства трубной продукции будет происходить с запуском новых технологических комплексов, создаваемых по программе технического перевооружения и рассчитанных на увеличение выпуска трубной продукции с повышенными качественными показателями.

Как следует из анализа состояния трубного рынка, доминирующее значение для трубных предприятий имеют требования, формируемые нефтегазовым комплексом. Кратко эти задачи можно сформулировать следующим образом:

- В связи с увеличением глубины залегания нефте- и газоносных пластов возрастают требования к прочностным характеристикам труб для магистральных газопроводов, в перспективе до Х100 – Х120, а также бесшовным трубам для разведки и добычи нефти и газа до групп прочности Р, Т (Р 110, Q 125).

- Увеличение рабочего давления в магистральных газопроводах до 9,8 МПа и выше также требует адекватного увеличения прочностных характеристик труб.

- Повышение требований к точности геометрических размеров труб нефтяного сортамента со стороны потребителей.

- Повышение требований к коррозионной стойкости и хладостойкости металла труб.

- Необходимость нанесения в заводских условиях наружного антикоррозионного и внутреннего гладкостного покрытия.

- Необходимость производства нарезных обсадных и насосно-компрессорных труб с газоплотными резьбовыми соединениями типа «Премиум».

- Ужесточение требований к объему и качеству контроля и испытаний труб.

В этой связи приоритетными направлениями в инвестиционной деятельности трубной отрасли в целом и ОАО «ТМК» являются следующие направления: модернизация и ввод новых мощностей по производству стали и трубной заготовки с высокими показателями качества, модернизация и внедрение новых средств неразрушающего контроля и испытаний продукции, увеличение мощностей по термической обработке и финишной обработке труб, развитие мощностей по производству бесшовных труб высокого качества, увеличение мощно-

стей по производству труб большого диаметра, разработка и внедрение природоохранных мероприятий.

В современных условиях успешно конкурировать на внутреннем и внешнем рынках могут только те трубные заводы и компании, которые успешно решают вопросы повышения качества продукции, дисциплины поставок, охраны окружающей среды и снижения затрат на производство на базе внедрения современных производственных комплексов и модернизации существующих технологий и оборудования. Другими словами, те предприятия, которые вопросам инвестиций в производство уделяют недостаточное внимание, обречены на проигрыш в конкурентной борьбе и, в конечном счете, уход с рынка.

Понимая это, в последние годы трубные заводы России, особенно крупные, вкладывали значительное средства в проекты, связанные с вводом новых современных производственных мощностей по производству труб и трубной заготовки. Инвестиции крупнейших российских трубных компаний в техническое перевооружение производства за 2005 – 2007 годы составили более 70 миллиардов рублей, в том числе: по ОАО «ТМК» - свыше 25 миллиардов рублей, по ОАО «ОМК» - около 20 миллиардов рублей, по ОАО «Группа ЧТПЗ» - свыше 17 миллиардов рублей, по ОАО «ИМЗ» - свыше 15 миллиардов рублей.

Так, на Выксунском металлургическом заводе введены в эксплуатацию I-я очередь цеха по производству труб большого диаметра мощностью около 500 тысяч тонн труб в год, новый участок объемной термической обработки сварных труб мощностью 300 тысяч тонн, линия нанесения наружного антикоррозионного покрытия, поточная линия по производству обсадных труб. Проведен значительный объем работ по модернизации действующих мощностей по производству и неразрушающему контролю электросварных труб.

На Ижорском металлургическом заводе введена в эксплуатацию линия по производству труб большого диаметра, проведена реконструкция стана «5000».

На Челябинском трубном заводе реконструированы трубосварочные станы 820 и 1220, установлены два механических экспандера, заменены приборы неразрушающего контроля, введена в эксплуатацию вторая линия нанесения покрытия на наружную поверхность труб мощностью 300 тысяч тонн, реконструированы мощности по производству обсадных труб и муфт.

 ISSN 1991-7848

На Первоуральском новотрубном заводе введены в эксплуатацию отделения для производства отводов, участки по производству труб для холодильников и труб для пневматических и гидравлических систем автомобилей.

В настоящее время процесс внедрения крупных инвестиционных проектов набирает еще больший размах.

На Выксунском металлургическом заводе успешно идет строительство литейно-прокатного комплекса мощностью свыше 1 миллиона тонн непрерывнолитого листа в год (в настоящее время на ДСП начаты «холодные испытания), ведется строительство стана «2000», продолжаются работы по строительству второй очереди цеха по производству труб большого диаметра, начато строительство широколистового стана «5000».

На Челябинском трубном заводе начато строительство линии по производству прямошовных труб большого диаметра, реализуется проект по созданию отделения по производству насосно-компрессорных труб.

На Первоуральском новотрубном заводе начата реализация проекта строительства электросталеплавильного цеха в составе ДСП, установки внепечной обработки стали и МНЛЗ мощностью 950 тысяч тонн в год.

Программа модернизации производства в Трубной Металлургической Компании стартовала в 2005 году. Она рассчитана до 2010 года, и ее конечным результатом является окончательный переход на выпуск конкурентоспособной продукции, отвечающей самым высоким требованиям стандартов качества. Общий объем инвестиций по программе превышает 1 миллиард 500 миллионов долларов США.

В 2005 – 2006 годах на предприятиях Компании было реализовано сразу несколько крупных проектов по реконструкции производства, а также была начата работа над новыми объектами, которым предстоит войти в строй в 2007 – 2008 годах.

На Таганрогском металлургическом заводе и Северском трубном заводе введены в эксплуатацию современные машины непрерывного литья заготовок с годовой производительностью 950 тысяч тонн в год каждая. Можно со всей ответственностью заявить, что эти установки в настоящее время являются самыми совершенными в мировой практике. На Таганрогском металлургическом заводе и Синарском трубном заводе введены в эксплуатацию участки для высадки концов насосно-компрессорных, безмуфтовых обсадных и бурильных труб. На

Северском трубном заводе в линии трубопрокатного агрегата введен в эксплуатацию прошивной стан, в результате чего существенно повысился выход годных труб. На Синарском трубном заводе внедрен обжимной стан поперечно-сдвиговой прокатки сплошных заготовок. Также на этом заводе введена в эксплуатацию станция разделения воздуха, что позволило полностью решить вопрос обеспечения технологии отжига труб в защитной атмосфере инертными газами. На Волжском трубном заводе реконструированы ДСП-150 и установка газоочистки, что позволило увеличить производительность ДСП до 900 тысяч тонн стали в год и существенно снизить уровень пылевых выбросов в окружающую среду.

Практически на всех трубных заводах активно велись работы по замене и модернизации средств неразрушающего контроля качества труб. Во многом благодаря этому, ушли в прошлое такие понятия, как выпуск труб с отступлениями от требований стандартов или с не полным их выполнением.

В настоящее время полным ходом ведется строительство ДСП с объектами инфраструктуры на Северском трубном заводе и начато строительство электропечного агрегата на Таганрогском металлургическом заводе, которые в ближайшем будущем полностью вытеснят мартеновский металл из трубного производства.

В текущем году планируется ввод в эксплуатацию трех отделений термической обработки труб на Таганрогском металлургическом заводе, Волжском и Синарском трубных заводах суммарной мощностью 740 тысяч тонн в год. Будет введен в эксплуатацию современный стан непрерывной горячей прокатки труб (PQF) на Таганрогском металлургическом заводе мощностью свыше 650 тысяч тонн труб в год.

На Волжском трубном заводе начата реконструкция действующего непрерывного стана, имеющая своей целью удвоение его производственной мощности, осуществляется строительство нового участка отделки обсадных труб мощностью 200 тысяч тонн труб в год. Завершена реконструкция участка горячего проката ТПА 50–200 трубопрокатного цеха № 1 с целью освоения производства труб нефтяного сортамента диаметром до 200 мм. В трубоэлектросварочном цехе в текущем году введена в эксплуатацию линия по нанесению внутреннего гладкостного покрытия труб, ведется реализация проекта по строительству линии производства прямошовных электросварных

 ISSN 1991-7848

труб диаметром 508 – 1420 мм и линии нанесения наружного трехслойного полиэтиленового покрытия.

В конце 2007г. начата реализация проекта комплексной реконструкции трубопрокатного цеха № 1 Северского трубного завода с заменой пиллигримовых станов современным ТПА с непрерывным станом. В рамках реконструкции намечено строительство также нового участка термической обработки труб, новых линий отделки гладких и нарезных труб, в т.ч. линии для нарезки резьб типа «Премиум».

Как показывает анализ, основная доля инвестиций в трубную отрасль России направляется на развитие мощностей трубных заводов, преодоление технического и технологического отставания от мировых производителей трубной продукции и обеспечение собственным металлом, трубной заготовкой, штрипсом и листовым металлом. Мощности трубных заводов России к 2010г. по сравнению с 2005г. увеличатся в 1,6 раза (до 15770 тыс. тонн), объем инвестиций в развитие мощностей к 2010г. превысит 100 миллиардов рублей.

Несмотря на сложный период 90-х годов, многие отраслевые специализированные институты восстанавливают свой научный и производственный потенциал. С основными из них российские трубные заводы и предприятия ОАО «ТМК» связывают долгосрочные партнерские отношения, которые помогают Компании успешно осваивать и развивать новые виды продукции и технологические процессы. Сотрудничество ОАО "ТМК" на основе долгосрочных программ начато с 2002 г. и является традиционным. За прошедшие годы на заводах Трубной Металлургической Компании совместно с ОАО "Газпром" (ООО "ВНИИГАЗ"), ЦНИИЧермет, «ВНИИСТ», ОАО «РосНИТИ» и другими специализированными институтами проведены работы по обеспечению технических требований к сварным и бесшовным трубам, применяемым в ОАО "Газпром" и «АК «Транснефть». Работа была удостоена Государственной премии России.

С ЦНИИЧермет им. Бардина подписано Соглашение о сотрудничестве до 2009г., в котором предусмотрены работы по созданию технологий изготовления рулонов для газопроводных труб категории прочности до X 80 и выше, решение вопросов коррозионной стойкости. В стадии организации сотрудничество с институтом «ЦНИИ КМ «Прометей».

Понимая важность научного сопровождения развития производства, ОАО «ТМК» прилагает усилия для развития отраслевого института ОАО «РосНИТИ», принята целевая программа создания экспе-

риментально-исследовательской базы, формируется кадровая политика, планируется долгосрочный бюджет.

В производстве труб нефтяного сортамента достигнуты следующие результаты:

- освоено производство газопроводных сероводородостойких труб для Астраханского газоконденсатного месторождения, а также производство обсадных труб категории прочности L80S в сероводородостойком исполнении для Оренбургского нефтегазоконденсатного месторождения;

- разработана целая гамма высокогерметичных газоплотных резьбовых соединений обсадных и насосно-компрессорных труб (ТМК-FMC, TMK-GF, TMK-CS, TMK-TTL-01, TMK-FMT), которые прошли всесторонние стендовые и промысловые испытания на месторождениях ОАО "Газпром";

- освоено производство труб в хладостойком исполнении для месторождений Крайнего Севера ОАО "Газпром" и др.

Подводя краткий итог, следует особо подчеркнуть сложность поставленных перед производителями труб и металлургами задач по обеспечению металлургического качества трубного металла и потребительских свойств труб, предназначенных для эксплуатации при низких температурах, в коррозионноактивных средах, в условиях высоких давлений и сезонного термоциклирования. Это обязывает металлургов и трубников, многие из которых производят собственную трубную заготовку, производить металл конкурентоспособного качества, без которого невозможно производство надежных отечественных труб для нефтегазового комплекса России.

Сегодня с уверенностью можно сказать, что российский трубно-металлургический комплекс в состоянии удовлетворить текущие потребности отечественных потребителей, в частности ТЭК, в полном объеме. Масштабное техническое перевооружение российских трубных предприятий, совместное с потребителями формирование перспективных технических требований, позволили производителям труб разработать и внедрить в серийное производство новые виды трубной продукции в соответствие с растущими потребностями нефтегазового сектора, машиностроительных отраслей, ЖКХ и других отраслей хозяйства.

 ISSN 1991-7848

УДК 621.774.35:62-539

Щербина Г.С., Коротченко В.Н., Олексюк О.В.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ТОЧНОСТЬЮ ПРОКАТКИ ГОРЯЧЕКАТАНЫХ ТРУБ

Рассмотрена задача стабилизации параметров технологического процесса производства горячекатаных труб с целью повышения точности толщины стенки за счет выбора рационального режима работы автоматической системы регулирования в условиях неполной информации.

Розглянута задача стабілізації параметрів технологічного процесу виробництва горячекатаних труб з метою підвищення точності товщини стінки за рахунок вибору раціонального режиму роботи автоматичної системи регулювання в умовах неповної інформації.

The assignment of technological process parameters stabilizing has been considered with the purpose of hot-rolled tubes walls thickness accuracy increase due to efficient operating conditions of regulatory systems within the framework of incomplete information

Введение

Наряду с совершенствованием оборудования, созданием новых и модернизацией существующих способов производства бесшовных горячекатанных труб важным резервом повышения их качества и снижения металлоемкости является автоматизация технологического процесса с целью повышения качества труб, одним из основных показателей которого является точность толщины стенки.

Проблема. В качестве показателя эффективности автоматической системы стабилизации толщины (АССТ) целесообразно использовать отношение компенсируемой при управлении дисперсии толщины и дисперсии последней при отсутствии управления.

$$\lambda = \frac{D_k}{D}, \qquad (1)$$

где компенсируемая дисперсия $D_k = D - D_a$, т.е. разница между дисперсией без управления и дисперсией при наличии управления [1].

Очевидно, что этот показатель может принимать значения в пределах от нуля до единицы.

Известно, что точность труб, полученных на том или ином трубопрокатном агрегате (ТПА), в основном, определяется способом их производства, составом и техническим состоянием основного технологического оборудования, стабильностью технологического режима прокатки, распределением деформаций металла по станам агрегата и совершенством калибровки рабочего инструмента.

Анализ исследований. В работе [2] показано, что в суммарном диапазоне рассеивания значений толщины стенки партии готовых труб на агрегатах со станами продольной прокатки 30-40% занимает

поле колебаний средней толщины стенки, 25-30% - продольная разностенность, а остальное – поперечная. В данной работе приведены результаты исследования работы системы совместного регулирования средней толщины стенки и продольной разнотолщинности.

Из работы [3] известно, что системы управления технологическими процессами должны быть системами управления по возмущению, т.к. строгое решение задачи инвариантности в системе регулирования по отклонению в общем случае невозможно. Вместе с тем, полностью инвариантные системы могут быть созданы на основе комбинированного способа регулирования. Однако, основной экономический эффект может быть получен за счет компенсации возмущений.

Для ряда ТПА были получены модели, позволяющие оценить возможную эффективность АССТ, выбрать ее структуру и алгоритм управления [4,5].

Однако, непосредственно экспериментальное изучение функционирования АССТ часто требует чрезмерно больших затрат средств и времени, а иногда и принципиально невозможно. Так, например, экспериментальное изучение функционирования автоматической системы невозможно до тех пор, пока система не создана и не изготовлена. Между тем, необходимо еще на стадии проектирования системы изучить все ее основные свойства, в частности эффективность ее функционирования в различных режимах с учетом всех действующих на нее случайных возмущений.

В таких случаях прибегают к статистическому моделированию.

Цель.Прокатный стан обычно относят к классу линейных моделей, т.к. при налаженном производстве возмущения изменяются в узком диапазоне. Этот класс моделей является относительно простым с точки зрения идентификации. Описание стана такой моделью базируется на предположении, что на ограниченных интервалах как пространственных, так и временных, условия стационарности и линейности выполняются. Кроме того, построение более сложных моделей не позволяет значительно повысить эффективность из-за высокого уровня помех [6].

Результаты исследований. Рассмотрим сначала задачу стабилизации средней толщины стенки труб. В этом случае процесс можно рассматривать как дискретный, а модель разностенности представить в виде:

$$\Delta y[N] = \sum_{i=1}^{n} \Delta x_i[N] b_i + \Delta y_z[N], \qquad (2)$$

где $\Delta x_i[N]$ - значения контролируемых входов на N-ной трубе;

b_i - коэффициент регрессии i-го контролируемого возмущения на толщину;

 ISSN 1991-7848

$\Delta y_z[N]$ - аддитивная помеха с нулевым математическим ожиданием и дисперсией, определяющей тесноту связи между контролируемыми возмущениями и выходной величиной.

Основными возмущениями на станах горячей прокатки являются колебание температуры и толщина подката.

В этом случае суммарная дисперсия толщины

$$\sigma_y^2 = \sigma_{y_x}^2 + \sigma_{y_z}^2 = b^2\sigma_x^2 + \sigma_{y_z}^2, \quad (3)$$

где $\sigma_{y_x}^2$ - дисперсия, обусловленная контролируемыми возмущениями;

$\sigma_{y_z}^2$ - дисперсия выхода, обусловленная помехами.

Оценка коэффициента корреляции

$$\hat{r} = \sqrt{1-\sigma_{y_z}^2/\sigma_y^2} = \sqrt{1-\sigma_{y_z}^2/\left(b^2\sigma_x^2+\sigma_{y_z}^2\right)}. \quad (4)$$

Откуда дисперсия помехи

$$\sigma_{y_z}^2 = b^2\sigma_x^2\left(1-\hat{r}^2\right)/\hat{r}^2. \quad (5)$$

Имитационное моделирование функционирования подсистемы стабилизации средней толщины стенки труб применительно к ТПА-140 в пакете Matlab/Simulink приведено на рис. 1. На этом агрегате основным возмущением является температура подката.

На основании априорной информации можно выбрать диапазон изменения контролируемого возмущения, существенно не влияющего на выход, поскольку уровень влияния помех соизмерим с влиянием контролируемой переменной, т.е. выбрать зону нечувствительности. При выборе этой зоны необходимо учитывать взаимосвязь эффективности управления со статистическими характеристиками контролируемых переменных.

Для определения вероятности попадания нормально распределенной случайной величины в интервал $(-\varepsilon,\varepsilon)$ воспользовались функцией Лапласа:

$$\varphi(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_0^u e^{-\frac{t^2}{2}}dt, \quad (6)$$

для которой составлены таблицы [7]. (Здесь $t = (\theta - m_\theta)/\sigma_\theta$).

При помощи функции Лапласа формула для симметричного интервала может быть представлена в виде:

$$\mathrm{P}(|\Delta\theta| < \varepsilon) = 2\varphi\left(\frac{\varepsilon}{\sigma_\theta}\right). \quad (7)$$

Полагая в формуле (7) последовательно $\varepsilon = h\sigma_\theta, h = 0.2,0.4,...,2$, и пользуясь таблицей функций Лапласа [7], нашли зависимость вероят-

ности попадания отклонений температуры $P(|\Delta\theta| < \varepsilon)$ в заданный интервал (рис.2).

Затем, варьируя величиной зоны нечувствительности по температуре $(\delta\theta)$, оценили дисперсию выходной толщины. В результате получили ее зависимость от величины зоны нечувствительности, показанную на рис. 2 .

При регулировании толщины проката в условиях помех, даже при незначительном отклонении любого возмущения, привод нажимных винтов приводится в действие. Таким образом, он практически непрерывно работает в режиме пуска-торможения, нажимные механизмы изнашиваются, а эффект от компенсации незначительных возмущений невелик.

Для того чтобы оценить взаимосвязь числа включений привода нажимных винтов с величиной зоны нечувствительности, необходимо определить вероятность попадания в симметричный относительно математического ожидания интервал $(\alpha = m_\theta - \varepsilon; \beta = m_\theta + \varepsilon)$. Так как управление ведется в отклонениях от текущего среднего значения температуры, то математическое ожидание возмущения равно нулю и, таким образом, необходимо определить вероятность попадания в интервал $(-\varepsilon, \varepsilon)$.

Выражение для нормальной одномерной плотности распределения температуры можно записать в виде

$$f(\theta) = \frac{1}{\sigma_\theta \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\theta - m_\theta)^2}{2\sigma_0^2}}, \qquad (8)$$

или, с учетом $m_\theta = 0$,

$$f(\theta) = \frac{1}{\sigma_\theta \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\theta^2}{2\sigma^2}}. \qquad (9)$$

Из анализа рис. 1 следует, что введение зоны нечувствительности $\delta\theta = 15 \div 20^0 C$ практически не сказывается на дисперсии выходной толщины при работе системы управления. Анализируя результаты моделирования $(см. рис. 1)$ видим, что при введении зоны нечувствительности около 40% труб прокатываются при номинальном зазоре валков, т.е. привод нажимных винтов не приводится в действие. Это позволяет существенно уменьшить износ нажимного механизма и сократить расход электроэнергии, потребляемой системой.

Проведенное моделирование управления продольной разностенностью дало возможность сформулировать требования к гидравлическому приводу и показало, что для достаточной эффективности регулирования поджим по длине производится один раз, что позволяет снизить продольную разностенность в 1.3...1.7 раза.

 ISSN 1991-7848

Выводы

Проведенные исследования показали, что система автоматического регулирования средней толщины стенки уменьшает ее дисперсию на 35...65% и снижает вес труб на 3...5%.

Управление продольной разностенностью труб позволяет снизить поле допуска на 3...5%.

Статистическое моделирование функционирования системы управления средней толщиной стенки показало, что введение зоны нечувствительности уменьшает износ нажимного механизма и снижает расход электроэнергии, практически не снижая при этом эффективность управления, причем сравнение экспериментальных и теоретических результатов показало их соответствие.

ЛИТЕРАТУРА

1. Щербина Г.С., Коротченко В.Н. Алгоритм управления размерами проката. – Сучасні проблеми металургії. Наукові вісті. Том 8. Пластична деформація металів. Дніпропетровськ : „Системні технології”. – 2005 – с. 366-370.
2. Исследование точности труб ТПА-140 завода им. Ленина/В.Н. Данченко, А.Н. Чернышев, Е.Н. Панюшкин, В.Н. Коротченко и др. – Днепропетровск, 1981. – 16 с. – рук. представлена Днепропетр. металлург. инс-том, Деп. в ГРНТБ УкрНИИНТИ 13 июля 1981 г., № 2937.
3. Основы управления технологическими процессами / Под ред. Н.С. Райбмана. Главная редакция физико-математической литературы. – М.: Наука, 1978, 440 с., ил.
4. Разработка и исследование алгоритмов адаптивного управления точностью проката / Г.С. Щербина, А.Н. Чернышев, М.Д. Зинченко, В.Н. Коротченко. – В кн.: Разработка и внедрение АСУ в прокатном производстве: Тез. докл. Всесоюзн. научно-техн. конф., М., 1983, с.23.
5. Разработка рациональной структуры автоматической стабилизации толщины сложных профилей проката / Г.С. Щербина, В.Н. Коротченко, М.Д. Зинченко и др. В кн.: Разработка и внедрение АСУ в прокатном производстве: Тез. докл. Всесоюзн. научно-техн. конф., М., 1983, с.23-24.
6. Адаптивное управление точностью прокатки труб. Под общ. ред. Ф.А. Данилова и Н.С. Райбмана. – 3-е изд., перераб., - М.: Металлургия, 1980 – 278 с., ил.
7. Пугачев В.С. Теория вероятности и математическая статистика. – М.: Наука, 1979, 497 с., с ил.

УДК 621.774.09:621.21

Буряк Т.Н., Вахрушева В.С., Тараненко А.А.

РОЛЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ТРУБ ИЗ КОРРОЗИОННОСТОЙКИХ МАРОК СТАЛИ И СПЛАВОВ В ФОРМИРОВАНИИ КАЧЕСТВЕННОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Виконано дослідження якості поверхні в трубах після різноманітних технологічних операцій. Розроблені технології, що дозволяють отримувати прецизійні труби з високим класом чистоти поверхні R_a менше 1 мкм.

Выполнено исследование качества поверхности в трубах после различных технологических операций. Разработаны технологии, позволяющие получать прецизионные трубы с высоким классом чистоты поверхности R_a менее 1 мкм.

Research of quality of surface is executed in tabes after different technological operations. Technologies, allowing to get precision tabes with the high class of cleanness of surface of R_a less than 1 mkm, are developed.

Введение

Опыт эксплуатации оборудования и трубопроводов, работающих под действием агрессивных сред в атомной энергетике, химической и пищевой промышленности, летательных и плавающих аппаратах, автомобильном транспорте, показывает, что их эксплуатационная надежность и долговечность существенно зависит от качества поверхности (ее чистоты, шероховатости и т. д.). В частности, именно состояние поверхности во многом определяет служебные свойства в т. ч. коррозионную стойкость труб и других изделий [1-5].

Технологии изготовления труб специального назначения для выше обозначенных отраслей включают последовательную цепь операций горячей и холодной деформации, термической и механической обработки, химико-технологической обработки (ХТО), что оказывает многофакторное и неоднозначное влияние на поверхность. Существующие стандартные методы и представления об оценке ее качества (перископия, профилометрия, оптическая микроскопия, ультразвуковой контроль и др.) не всегда позволяют достоверно оценить состояние поверхности с точки зрения эксплуатационной надежности труб.

Важным аспектом в решении поставленных задач является разработка адекватной методологии анализа состояния поверхности труб на основе комплексного подхода на всех этапах трубного производства с привлечением наукоемких методов исследований, например, растровой электронной микроскопии (РЭМ). До настоящего времени из-

© БУРЯК Т.Н., ВАХРУШЕВА В.С., ТАРАНЕНКО А.А., 2008

вестно мало работ по исследованию качества поверхности труб в процессе всего технологического цикла.

Материал и методы исследования. Материалом исследования служили образцы от опытных партий труб из коррозионностойкой стали 08Х18Н10Т и 03Х17Н14М3, сплава циркония Zr1Nb, отобранные после различных операций в процессе технологического передела. Трубы получены на промышленном оборудовании в заводских условиях по специально разработанным технологиям[1]. При проведении исследований и трактовке их результатов задействованы методы световой и растровой электронной микроскопии (оценка микроструктуры и топографии поверхности) и профилометрии (оценка шероховатости поверхности).

Результаты выполненных исследований и разработок. Традиционно в холоднодеформированных трубах малых размеров из коррозионностойкой стали и сплавов применяют параметр шероховатости R_a (среднее арифметическое отклонение профиля), который нормирован в пределах ≤1,6-3,2 мкм в соответствии с ГОСТ 2789-73 “Шероховатость поверхности. Параметры, характеристики и обозначения”, что соответствует классу 6-5. Однако в ряде случаев, например, при производстве труб для транспортировки сверхчистых газов, в пищевой или электронной промышленности, в тепловыделяющих элементах АЭС, рекомендованы более высокие категории качества (R_a≤0,3-1,6 мкм, класс 9-6). Достичь заданного уровня можно только за счет комплексного подхода к построению технологического процесса, включающего рациональный выбор способа выплавки металла, режимов холодной прокатки, термической обработки, отделки (ХТО, правки, шлифовки). Единого мнения относительно оптимального способа обработки поверхности не существует. При этом необходимость такой обработки признана всеми производителями в области труб из коррозионностойких сталей и сплавов.

В производственном цикле технологической инструкцией предусмотрен контроль качества труб на переделе, заключающийся в основном в осмотре поверхности. Традиционно при производстве прецизионных видов труб осуществляется визуальный осмотр наружной поверхности – на каждой трубе и внутренней поверхности – на каждой 5-й трубе. Готовые трубы подлежат осмотру 100%, наружная поверхность осматривается невооруженным глазом под лампой, а внутренняя – перископом с каждого конца. На поверхностях труб не до-

[1] В работе принимали участие сотрудники ГП «НИТИ» с.н.с. БЛАГОВА В.А. и с.н.с. ЯРОШЕНКО Н.В.

пускаются задиры, глубокие царапины, вмятины, травильная сыпь и другие глубокие дефекты. Контроль поверхности осуществляется визуально по образцам-эталонам или на продольных образцах – “лодочках” на профилографах – профилометрах.

На рис.1 проанализировано изменение параметра шероховатости R_a в процессе изготовления опытных партий труб из стали 08Х18Н10Т размером ∅28×1,5 мм, ∅12×1 мм, ∅6×1 мм. Традиционно принято считать, что термическая обработка в защитной атмосфере или вакууме улучшает состояние поверхности. Поэтому на начальных этапах проводили термообработку в среде аргона, а по мере уменьшения размера труб и продвижения к финишным этапам перешли к среде водорода. Однако, как видно на графике термообработка

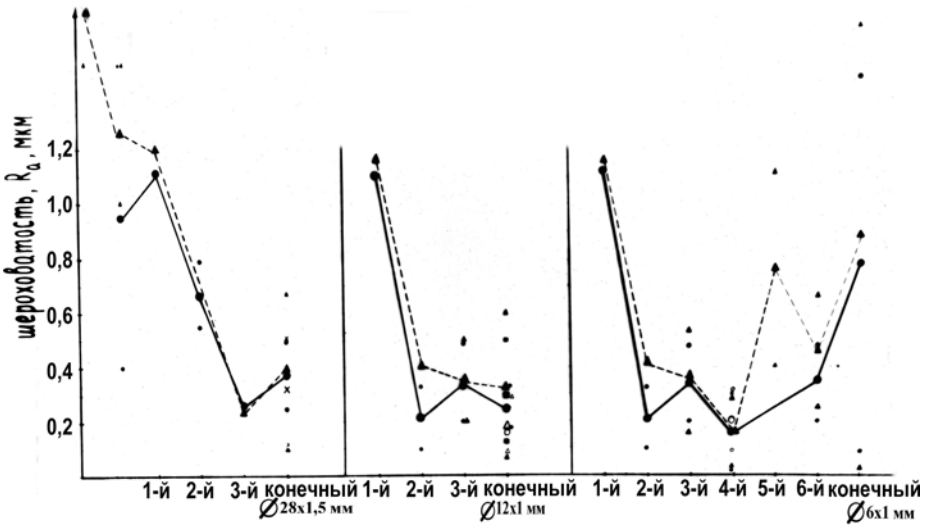


Рисунок 1 - Влияние технологических факторов на шероховатость поверхности в процессе изготовления труб из стали 08Х18Н10Т: • – холоднодеформированная труба; ▲ – термообработанная труба; ■ – 1-кр электрополировка; × – 3-кр электрополировка; ○ – 4-кр электрополировка; Δ – 10-кр электрополировка

даже в защитной атмосфере приводит к незначительному увеличению параметра шероховатости. Для исправления ситуации трубы размером Ш12Ч1 мм были подвергнуты электрохимической полировке. Однократная операция против ожидаемого привела к ухудшению поверхности и только 4-х и 10-ти кратная электрохимполировка позволила существенно уменьшить шероховатость (рис. 1).

Помимо технологических факторов существенное влияние оказывает структура металла. В этой связи с помощью световой микроскопии и профилометрии получены взаимоувязанные результаты по влиянию структуры на качество поверхности труб размером 12×1 мм из стали 03Х17Н14М3 различного способа производства (газо-

 ISSN 1991-7848

кислородного рафинирования (ГКР) и центробежного литья в вакууме (ВЦБЛ)). Установлено, что объемная доля неметаллических включений составляет 0,125-0,156% в металле ГКР и 0,107-0,288% в металле ВЦБЛ. Включения выходящие на поверхность трубы ухудшают ее состояние. Прослеживается прямая зависимость по значениям параметра шероховатости, который составляет R_a=0,21-0,48 мкм в трубах из металла ГКР и R_a=0,13-0,58 мкм из металла ВЦБЛ.

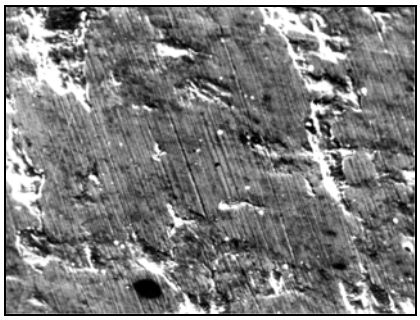
В целом, можно утверждать, что разработанные технологии позволяют получить сверхчистые трубы из коррозионностойкой стали высоким классом чистоты поверхности, где R_a менее 1 мкм.

Для получения более объективных данных, по влиянию различных технологических факторов на состояние поверхности были выполнены топографические исследования с помощью РЭМ на образцах от труб (рис. 2).

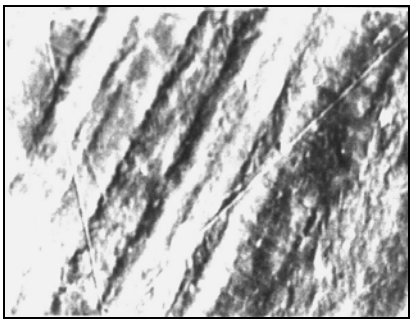
Как известно, в качестве заготовки поступающей на холодный передел используют горячедеформированную трубу после механической обработки (расточки-обточки) с шероховатостью поверхности R_a=3,2. На поверхности такой трубы наблюдается зернограничный рельеф с царапинами и рисками в состоянии после горячей деформации, а также, следы от резца после расточки-обточки, точечные дефекты, связанные с наличием в структуре включений.

После холодной прокатки на поверхности имеются риски, царапины, растрескивание по границам зерен, незначительные вдавы или задиры (рис. 2 а, б), являющиеся следствием контакта металла прокатываемой трубы и инструмента. Термическая обработка в защитной атмосфере или вакууме способствует раскрытию границ зерен с углублением дефектов, что и приводит к увеличению параметра шероховатости в трубах (рис. 2 в, г).

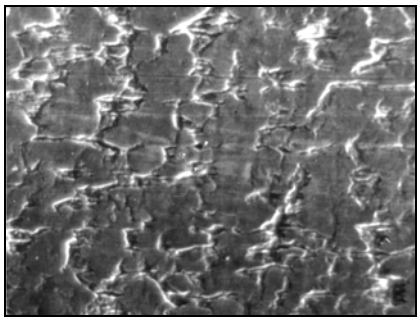
Операции, назначение которых носит ремонтный или улучшающий характер, также могут способствовать повреждению поверхностных слоев труб. Так, например, при выполнении правки наносятся риски, вмятины и царапины. Химическое травление может приводить к появлению дефектов на поверхности в виде растравов (рис. 2 е). Шлифовка (рис. 2 д) или многократная электрохимическая полировка (рис. 2 з) заметно выравнивают поверхность, как бы сглаживая рельеф и тем самым, улучшая ее состояние. Однако полностью исключить неровности, которые остались от неметаллических включений, не удалось.



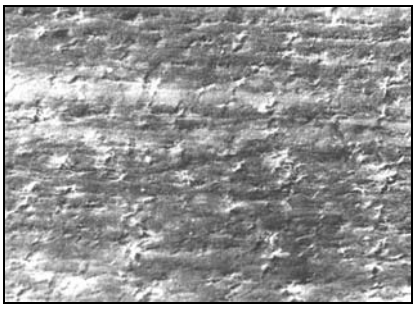
а ×1000



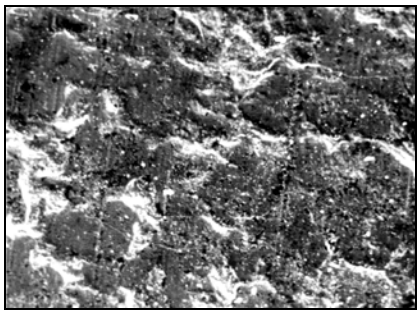
б ×636



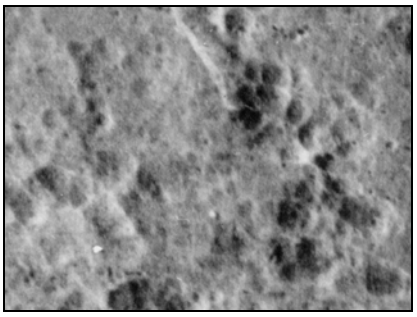
в ×520



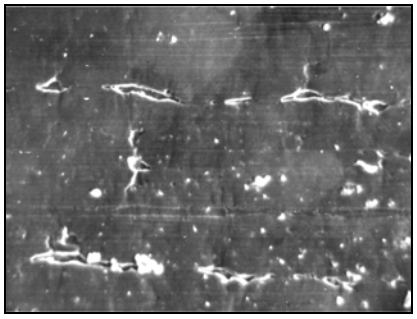
г ×1000



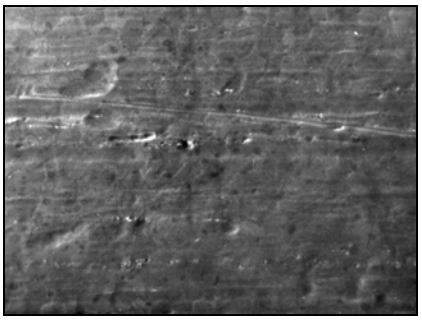
д ×1000



е ×431



ж ×510



з ×510

Рисунок 2 - Топография поверхности труб, полученная с помощью РЭМ, после различных технологических операций: а, б – холодной прокатки (сталь 08Х18Н10Т, сплав Zr1Nb); в – термообработки в защитной атмосфере (сталь 08Х18Н10Т);
г – термообработки в вакууме (сплав Zr1Nb); д –шлифовки (сталь 08Х18Н10Т);
е – после травления (сплав Zr1Nb); ж – однократной электрохимполировки (сталь 08Х18Н10Т); з – многократнойэлектрохимполировки (сталь 08Х18Н10Т)

ISSN 1991-7848

Т.о. на основании комплексного подхода, включающего привлечение наукоемких методов исследования, в частности РЭМ установлено, что традиционно существующие технологические операции не всегда способны обеспечить истинно высокую чистоту поверхности в трубах, а методы оценки не всегда адекватны. По целому ряду причин, в том числе экономических, на сегодня в редких случаях практикуется поставка труб из нержавеющих сталей после электрохимполировки, особенно многократной. С точки зрения условий эксплуатации труб шлифовка или ХТО бывают запрещены требованиями технических условий.

Наиболее целесообразным представляется проводить работы в направлении формирования оптимальной структуры труб (повышения однородности и чистоты металла, уменьшения неметаллических включений и т.д.), а также использования рациональных калибровок прокатного инструмента, технологий холодной прокатки и правки, включая рациональный выбор маршрутов ХТО и деформации, смазочных материалов. Эти направления получили дальнейшее развитие при разработке технологии изготовления циркониевых труб для тепловыделяющих элементов АЭС.

Для снятия газонасыщенных, дефектных и загрязненных поверхностных слоев при производстве труб из сплавов циркония выполняют такие операции, как глубокое и струйное травление. Исследования показывают, что при глубоком травлении снимается слой до 100-130 мкм, а при струйном травлении до 30-50 мкм. Опыт подтвердил, что в случае неблагоприятно выбранного режима или состава реактива при ХТО могут появляться питтинги и растравы на поверхности (рис. 2 е). При стравливании незначительного слоя, толщиной 10-20 мкм, на поверхности образуется окисная пленка, повышающая коррозионную стойкость труб. При этом одновременно на поверхности оседают ионы фтора. Для удаления ионов фтора и поврежденных слоев используют шлифовку, полировку, гидравлическую обработку, а также струйное травление без доступа воздуха.

Поэтому были разработаны и опробованы новые технические решения, направленные на улучшение качества поверхности циркониевых труб[2].

Впервые передельные горячепрессованные трубы из сплава Zr-1Nb после расточки-обточки были подвергнуты абразивно-пескоструйной об-

[2] В работе принимали участие сотрудники ГП «НИТИ» к.т.н.. КАРАСИК Т.Л и к.т.н.. БИЛЬДИН К.М

работке. Это позволило обеспечить параметр шероховатости R_a менее 3,2 мкм (R_a = 1,2-1,5 мкм).

Далее для обеспечения стабильности процесса холодной прокатки и качества поверхности труб, а именно предотвращения налипания прокатываемого металла на инструмент и появления задиров, на первом холодном переделе проведены эксперименты с использованием новых технологических смазок: импортного производства марки ST 4000P (на основе вязкого полимера), марки ST 230P (с хлором), а также разработанной в ГП “НИТИ” смазки на основе хлор-парафина.

Результаты исследований показали, что как и предполагали имеются сложности с удалением смазки на основе полимеров с поверхности труб. Не смотря на стабильно прошедший процесс прокатки, резко ухудшилась шероховатость поверхности по сравнению с исходным состоянием, которая составила R_a=2,9-4,8 мкм по наружной поверхности и R_a=5,9-6,3 мкм по внутренней поверхности. Безполимерные смазки с хлором позволили сформировать в трубах первого холодного передела удовлетворительное качество поверхности в пределах R_a=0,9-1,8 мкм по наружной поверхности и R_a=0,8-1,5 мкм по внутренней поверхности.

Смазки с хлором и хлор-парафином были взяты за основу при последующих переделах для получения труб-оболочек ТВЭЛ размером ∅ 9,13×0,7 мм.. При этом были скорректированы режимы холодной прокатки и ХТО.

Установлено, что уровень шероховатости поверхности в готовых трубах из сплава Zr1Nb (R_a = 0,4-0,6 мкм) удовлетворяет требованиям (рис. 3).

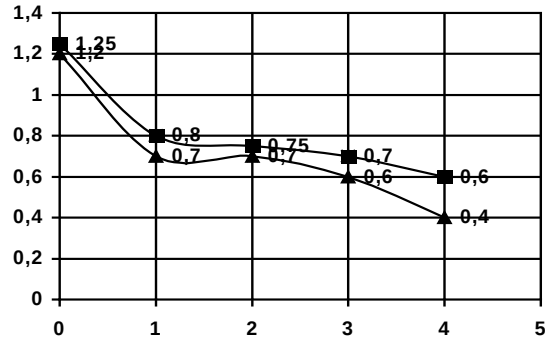


Рисунок 3 - Изменение параметра шероховатости труб из сплава Zr1Nb в процессе трубного передела по наружной (▪) и (▲) внутренней поверхностям:
0 – исходная горячепрессованная труба после расточки-обточки и пескоструйной обработки; 1–3 – передельная холоднодеформированная труба; 4 – готовая труба для ТВЭЛ ∅ 9,13×0,7 мм

 ISSN 1991-7848

Также полученные трубы выдержали ультразвуковой контроль и по основным показателям (структуре, механическим свойствам и др.) соответствовали требованиям технических условий.

Выводы

Разработаны и опробованы в промышленных условиях, сквозные технологии получения прецизионных труб из коррозионностойких сталей и сплава циркония с высоким качеством поверхности по всему переделу ($R_a \leq 1$ мкм).

С помощью РЭМ и профилометрии определены критические операции, оказывающие основополагающее влияние на состояние поверхности труб. К ним относятся, прежде всего, операции деформирования и химико-технологической обработки, важное значение имеет качество передельной трубы.

Разработанные технологические мероприятия по обеспечению качества поверхности в трубах, могут быть адаптированы в производстве проволоки, прутков, ленты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Влияние качества поверхности канала труб на стойкость против межкристаллитной коррозии / Ан. Н. Серебряков, Е. Л. Шулин, Ал. В. Серебряков и др. // Металлург (РФ). – 2004. – № 11. – С. 53-55.
2. Повышение качества поверхности холоднодеформированных труб из коррозионностойкой стали / Ан. Н. Серебряков, Е. Л. Шулин, Ал. В. Серебряков и др. // Металлург (РФ). – 2004. – № 9. – С. 61-62.
3. Некрасова Г.А., Бибилашвили Ю.К., Суханов Г.И. Разработка оболочек ТВЭЛов с барьерным покрытием за рубежом // Обзор. - Цирконий в атомной промышленности. – М.: ЦНИИАтоминформ, 1987. – Вып. 15. – 40 с.
4. Иванова С.В., Бочаров О.В., Шиков А.К. Влияние технологических факторов на процесс поглощения водорода циркониевыми компонентами активных зон реакторов ВВЭР и РБМК // Матер. 15-й Междунар. конф. по физике радиац. явлений и радиац. материаловедению. – Алушта, 2002. – С. 115-116.
5. Займовский А.С., Никулина А.В., Решетников Н.Г. Циркониевые сплавы в атомной энергетике. – М.: Энергоиздат, 1981. – 232 с.

УДК 621.774:669.15-194:621.78:620.18

Вахрушева В.С., Буряк Т.Н., Лёткин А.М.,

Терещенко А.А., Чекмарёв В.В.

ПОВЫШЕНИЕ КОМПЛЕКСА КАЧЕСТВЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТРУБ ИЗ КОРРОЗИОННОСТОЙКИХ МАРОК СТАЛИ, ПОСТАВЛЯЕМЫХ ПО ЗАРУБЕЖНЫМ СТАНДАРТАМ

Запропоновані ресурсозберігаючі технології і вдосконалені параметри окремих технологічних процесів, сприяючі підвищенню конкурентоспроможності труб відповідно до вимог зарубіжних стандартів.

Предложены ресурсосберегающие технологии и усовершенствованны параметры отдельных технологических процессов, способствующие повышению конкурентоспособности труб в соответствии с требованиями зарубежных стандартов.

Power saving technologies and improved parameters of separate technological processes, cooperant the increase of competitiveness of tubes in accordance with the requirements of foreign standards are offered.

Введение

В настоящее время в Украине достаточно широко освоено производство труб из коррозионностойких марок стали по зарубежным стандартам, многие из которых содержат ряд специфических требований по механическим, технологическим, коррозионным испытаниям, неразрушающему контролю (ISO 13680, ASTM A312, ASTM A213).

Гарантией конкурентоспособности отечественных труб на внутреннем и на мировом рынке, является обеспечение в них комплекса как основных требований (химический состав, геометрические размеры, механические свойства при растяжении, стойкость к межкристаллитной коррозии), так и дополнительных требований (однородная по толщине стенки рекристаллизованная структура, стойкость к питтинговой коррозии и коррозионному растрескиванию под напряжением, скорректированные значения твёрдости) и др. Некоторые из указанных требований отсутствуют в отечественной документации при производстве труб из коррозионностойких сталей по ГОСТ 9940, ГОСТ 9941, ТУ 14-3-197-89, ТУ 14-3-219-89 и др.

Полученные научно-технические результаты. Как показывает опыт, формирование в заводских условиях регламентированного комплекса структуры и свойств в металле труб из высоколегированных марок коррозионностойкой стали является весьма сложной пробле-

© ВАХРУШЕВА В.С., БУРЯК Т.Н., ЛЁТКИН А.М., ТЕРЕЩЕНКО А.А., ЧЕКМАРЁВ В.В., 2008

 ISSN 1991-7848

мой, решение которой во многом зависит от целого ряда факторов – условий выплавки, разливки, кристаллизации, пластической деформации, термической обработки, правки и т.д.

Для обеспечения требуемого уровня качества труб первым этапом является получение качественной заготовки. Проведенный анализ показывает, что традиционно при производстве нержавеющих труб доминирует деформированная трубная заготовка (после ковки или горячей прокатки), которая обычно характеризуется значительной неоднородностью структуры и свойств (рис. 1), что затрудняет их равномерное формирование на регламентированном уровне в трубах. Однако в мировой практике широко используется недеформированная заготовка, в частности, непрерывнолитая.

В предшествующие годы трубным институтом проведены исследования на предмет получения труб непосредственно из недеформированной литой заготовки (после стационарного, центробежного и непрерывного литья) [1-3]. Приёмы современной специальной электрометаллургии на стадиях внепечной обработки, в т.ч. литья и кристаллизации, позволяют регулировать процессы структурообразования в отливках, существенно уменьшив макроликвацию. Установлено, что благоприятно выбранные схема и величина деформации, позволяют уже на первом горячем переделе трансформировать исходную дендритную структуру в однородную рекристаллизованную без проведения дополнительной термической обработки горячедеформированных труб.

Положительные результаты применения литых заготовок подтверждены получением труб различных видоразмеров (диаметром от 2,3 мм до 325 мм) из стали марок 08Х18Н10Т (аналог ТР 321), ТР 304 (аналог 03…06Х18Н10), 12Х18Н10Т (аналог ТР 321Н), 03Х17Н14М2 (аналог ТР 316L), 09Х16Н15М3Б, хромо-никелевого сплава ХН40МГБТЮ (табл. 1), по механическим свойствам, коррозионной стойкости, величине зерна, соответствующих нормативным требованиям.

Кроме того, применение литой недеформированной заготовки, например, после непрерывного литья, имеет несомненные экономические преимущества перед деформированной в виду сокращения энергозатрат и снижения расходного коэффициента металла, связанного с исключением операций нагрева, деформации, механической обработки.

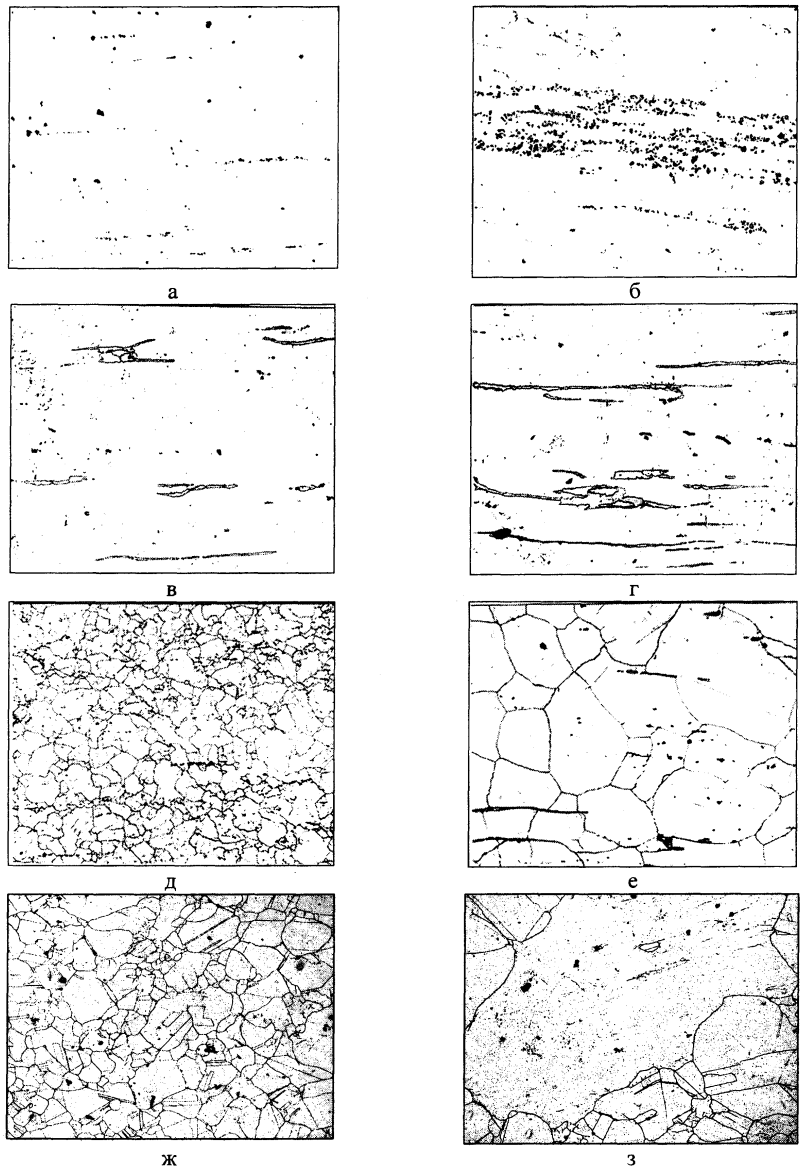


Рисунок 1- Микроструктурная неоднородность по сечению кованой заготовки из коррозионностойкой стали на аустенитной основе в поверхностных слоях (а, в, д, ж) и в сердцевине (б, г, е, з): а, б – неметаллические включения; в, г – ферритная фаза; д, е – зёренная структура (сталь 08Х18Н10Т); ж, з – зёренная структура (сталь TP304L)

Следующим направлением обеспечения конкурентоспособности труб, является повышение их технологической пластичности при изготовлении крутоизогнутых деталей и элементов трубопроводов и эксплуатационной надёжности. Как свидетельствует [4], основными видами разрушений трубопроводов и трубных систем из коррозионностойких сталей являются межкристаллитная и питтинговая коррозия, коррозионное растрескивание под напряжением в процессе эксплуатации. Важным этапом является возможность изготовления

 ISSN 1991-7848

U-образных элементов без образования трещин и надрывов в трубах, для этого твёрдость металла труб не должна превышать 80 HRB [5], при существующих в стандартах ASTM A312 и ASTM A213 нормах не более 90 HRB.

Таблица 1

Качественные показатели труб, полученных по новым технологиям из литой недеформированной заготовки

№ п/п	Марка материала, размер трубы, мм	Массовая доля углерода, %	Размер зерна, мкм	Механические свойства (20°C)		Склонность к МКК
				$\sigma_в$, Н/мм^2	δ_5, %	
1	ХН40МГБТЮ ∅ 2,3×0,3	0,009-0,011 ≤ 0,02	23-34 23-49	640-650 ≥ 539	42-44,5 ≥ 35	стойкие стойкие
2	03Х17Н14М3 ∅ 14×2	0,003-0,02 ≤ 0,03	23-34 не реглам.	600-605 490-690	46-48,5 ≥ 40	стойкие стойкие
3	12Х18Н10Т ∅ 25×3	0,04-0,085 ≤ 0,12	16-23 не реглам.	545-580 ≥ 549	36-45 ≥ 37	не оценивали за потребностью
4	ТР304 (типа 06Х18Н10) ∅ 30,162×1,65	0,035-0,059 ≤ 0,08	31-44 не реглам	617-706 ≥ 515	33,5-35,5 ≥ 35	стойкие стойкие
5	08Х18Н10Т ∅325×16	0,038-0,04 ≤ 0,08	22-44 ≤ 88	571-575 ≥ 549	66-67 ≥ 37	стойкие стойкие
В числителе – фактические показатели качества труб; в знаменателе – требования НД: ТУ 14-3-1314-85(1); DIN 17458-85(2); ГОСТ 9941-81(3); ASTM A 213/A213M-92(4); ТУ 14-3-197-89(5)						

Проведенные исследования показали, что оптимальным для обеспечения стойкости к МКК металла теплодеформированных труб из стали ТР 304L и ТР316L является формирование аустенитного зерна №№ 8-10, при этом HRB в 60% превышает 80 и может достигать 90 и более единиц. Такое состояние характеризуется повышенным уровнем остаточных напряжений I рода, где σ_t достигает 7...8 кгс/мм^2.

Поэтому для комплексного обеспечения коррозионной стойкости и технологической пластичности разработаны режимы термической обработки и правки труб, направленные на снижение уровня остаточных напряжений. Суть предложенных режимов заключалась в том, что температуру нагрева под закалку выбирали из условия формирования величины зерна в трубах не менее № 7 (№ 6,5) по шкалам стандарта ASTM E112, а правку готовых труб осуществляли в два прохода таким образом, чтобы величины изгибающих усилий превышали максимальные упругие значения металла труб не более, чем на 5-8%. Остаточные напряжения σ_t составили -2,24...-3,19 кгс/мм^2.

При проведении экспериментов руководствовались тем, что в практике производства труб из высоколегированных коррозионностойких сталей известна весьма жёсткая зависимость между величиной зерна, механическими и технологическими свойствами, коррозионной стойкостью.

Особо следует отметить, что все исследованные образцы от труб из стали TP 304L и TP 316L выдержали испытания на МКК как с внутренней, так и с наружной поверхностей, что во многом обусловлено достаточно однородной рекристаллизованной структурой (рис. 2) с наличием двойниковых низкоэнергетических границ (рис. 2, в, г). Это подтверждает стабильность и совершенство структуры, сформировавшейся по скорректированным режимам термообработки, и положительно влияет на комплекс свойств. Укрупнение зерна до №№ 7, 6 в трубах, полученных в процессе эксперимента (в трубах, изготовленных по традиционной технологии, доминирует мелкое зерно №№ 8...10), должно способствовать уменьшению питтингообразования [6]. Это объясняется меньшей протяжённостью границ в крупнозернистой структуре, как мест потенциального появления очагов питтинговой коррозии, т.к. их зарождение обычно происходит на границах раздела.

Кроме того, при определении остаточных напряжений I рода по методу Давиденкова обнаружены сжимающие напряжения (со знаком минус). В этой связи следует принимать во внимание, что наличие напряжений сжатия положительно влияет на некоторые свойства труб, в частности, повышает стойкость к коррозионному растрескиванию под напряжением и чем ниже в целом уровень остаточных напряжений, тем выше сопротивление металла этому виду коррозии.

Кривизна труб, полученных по скорректированным режимам, удовлетворяет требованиям и составляет менее 1 мм на 1 м трубы. Применённая схема двухпроходной правки со снижением усилий также положительно влияет на уменьшение овализации трубы, в частности на концевых участках (обеспечивается круглость поперечного сечения).

Из приведенных в табл. 2 данных видно, что трубы из стали TP 304L и TP 316L удовлетворяют основным и дополнительным требованиям стандартов ASTM, обладают необходимым уровнем твёрдости (HRB $\leq$ 80), который обеспечивает технологическую пластичность при гибке.

Эксперименты проведены на трубах, полученных способами тёплой и холодной прокатки, безоправочного волочения. Представляет-

 ISSN 1991-7848

ся, что в трубах, полученных способами холодной деформации, предотвращается науглероживание поверхности и тем самым исключается вредное влияние смазки на графитовой основе, применяемой при тёплой прокатке. Это положительно влияет как на коррозионную стойкость, так и на снижение упрочнения поверхностных слоёв труб.

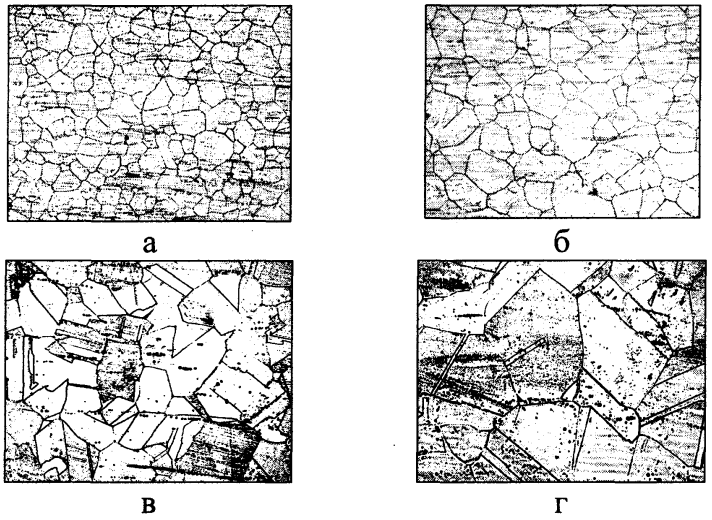


Рисунок 2 - Микроструктура холоднодеформированных труб, полученных по усовершенствованным режимам термообработки и правки: а, в – сталь ТР 304L; б, г – сталь ТР 316L; а, б – травление на границы общего типа; в, г – травление на низкоэнергетические границы;

Таблица 2

Качественные показатели труб из коррозионностойких марок стали, обработанных по скорректированным режимам термообработки и правки

Марка стали, размер труб, мм	Способ деформации	Механические свойства			HRB	МКК	Величина зерна, №
		σ_B, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5, %			
304L ∅28×2,0	тёплая прокатка	510	227	47	77	стойкие	7
304L ∅24,5×2,11	холодная прокатка	620	305	47	77	стойкие	6
316L ∅12,7×1,2	холодная прокатка	530	230	57	63	стойкие	6,5
316L ∅10×5	холодное б/о волочение	–	–	–	78	стойкие	6
304L ∅10×5	холодное б/о волочение	–	–	–	64	стойкие	7
Требования ASTM A312; ASTM A213	–	н.м. 485	н.м. 170	н.м. 35	н.б. 90 (по треб. н.б. 80)	стойкие	–

Выводы

1. На основании требований регламентируемых современными потребителями, обоснованы условия формирования структуры и свойств, обеспечивающих технологическую пластичность и коррозионную стойкость в металле труб, изготовляемых по зарубежным стандартам.

2. Предложены ресурсосберегающие и экологически чистые технологии производства труб из коррозионностойких марок стали с контролируемыми параметрами качества металла, включающие комплексные мероприятия по использованию литой недеформированной заготовки, корректировке режимов закалки и правки готовых труб.

3. Показано, что полученные в ходе эксперимента трубы, соответствуют основным и дополнительным требованиям зарубежных стандартов ASTM A312 и ASTM A 213 по твёрдости, уровню механических свойств при растяжении, стойкости к межкристаллитной коррозии, кривизне и др., имеют однородную рекристаллизованную структуру.

4. Полученные результаты могут быть адаптированы при производстве различных видоразмеров труб по отечественным и зарубежным стандартам.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вахрушева В.С., Буряк Т.Н., Лезинская Е.Я., Ярошенко Н.В. Управление структурой и свойствами труб специального назначения из коррозионностойких марок стали// Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2006. - № 3. – С.
2. Буряк Т.Н. О применении литых заготовок при производстве труб для атомной энергетики//Теория и практика металлургии. – 2003.-№5-6. – С. 92-96.
3. Остренко В.Я., Гейко И.К., Рассадин С.Я., Васюченко В.Е., Симоненко О.А. Деформируемость полых непрерывнолитых заготовок из стали 1-Х23Н18// Тематический сб.: Производство труб. – М.: Металлургия, 1978. - № 4. – С. 9-15.
4. Hamada H. The Influence of Carbon Content In Austenitic Stainless Steel or Corrosion Behavior of Several Corrosion Environments//Technical Documents for Seamless Stainless Steel tupe and pipe. – Kobe Steel, LTD, Japan. – Booklet № 75S1, 1975. – 17 p.
5. Hamada H. Bending Method and Material Characteristics on U-Bent Portion of TP 304 Stainless Steel Tube//Technical Documents for Seamless Stainless Steel tupe and pipe. – Kobe Steel, LTD, Japan. – Booklet № 75S2, 1975. – 18 p.
6. Ульянин Е.А. Коррозионностойкие стали и сплавы.: М.: Металлургия, 1991. – С. 24-36.

 ISSN 1991-7848

621.777

Golovko O., Broer Ch., Bosse M., Schaper M., Bach Fr.-W.

QUALITY OF TUBES OF MAGNESIUM ALLOY AZ31 AT THE DIFFERENT PORTHOLE DIES GEOMETRY AND TEMPERATURE PARAMETERS

Исследовано влияние конструкции прессового инструмента и параметров процесса прессования на показатели качества труб из магниевого сплава системы Mg-Al-Zn-Mn.

Досліджено вплив конструкції пресового інструменту й параметрів процесу пресування на показники якості труб з магнієвого сплаву системи Mg-Al-Zn-Mn.

Influence of extrusion tool and extrusion parameters on tube quality indices made of magnesium alloy of system Mg-Al-Zn-Mn.

Introduction

The advantages of extruded semi-finished products of magnesium alloys are follows: high strength (including fatigue strength) and stiffness, absence of aging effect, high damping properties and practically 100% recycling. If an existing price for primary magnesium is not changed the consumption of tubes and shapes of magnesium alloys will rise, first of all in transport engineering.

Literature analysis. Considered in this work magnesium alloy is widespread enough, however the information about the tool used for its extrusion and relationship of mechanical properties and quality of tubes to process's temperature -speed conditions is quite limited.

The information about used temperature-speed modes of extrusion and mechanical properties of shapes and tubes of the closest alloys by the chemical composition (system Mg-Al-Zn-Mn) are given in works [1, 2].

Data on the rational temperature-speed modes of extrusion are quite diverse and even inconsistent. Extrusion is carried out normally at the extrusion ratios (ER) about 30. Rods and tubes produced with a long mandrel allow to using the greater ER.

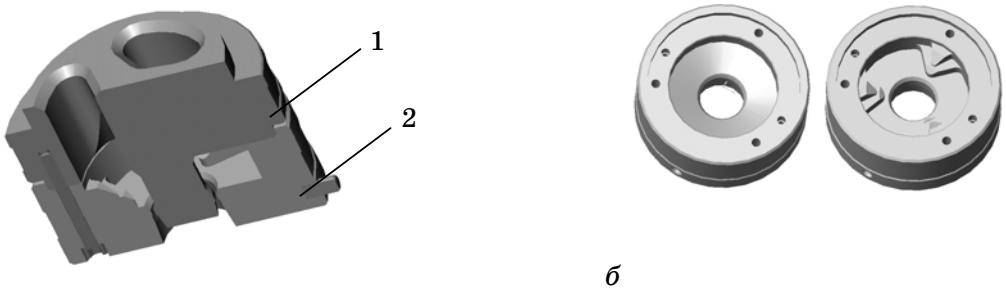
The purpose of the present work is to determine of rational modes of extrusion of tubes ∅40×2 mm from the magnesium alloy AZ31B with taking into account geometry of the porthole dies.

Experimental methods. The experiments were carried out on 10-MN horizontal hydraulic press of Institute for material science of Lebniz University Hanover. A diameter of the internal core of the container is 125 mm. Process of extrusion is direct without forward tension. Ho-

© GOLOVKO O., BROER CH., BOSSE M., SCHAPER M., BACH FR.-W. , 2008

mogenized turned billets with diameter of 120 mm and length 260-300 mm that were casted in a chill mould.

The extrusion was conducted through the porthole dies that are widespread in aluminium shapes production. However, form of a die was differed from traditional one for aluminium. Two dies were used with the same mandrel plate (fig. 1). The first had the double-cone inclined bottom. The second die was designed with the flat bottom on which three pairs of steps are placed. The axes of steps coincide with axes of the mandrel's ports.



а *б*

Figure 1 – Tool set: *a* – porthole die (1 – mandrel plate; 2 – die plate); *b* – conical die; *c* – flat-stepped plate die

Temperature of the billet T_B and correlation between temperature of the container T_C and temperature of the billet (tab. 1) were also varied. The extrusion tool was heated up to a temperature that was equal to billet temperature. Ram speed was 2 mm/s, extrusion ratio 50, outflow speed 6 m/min.

Table 1

The plan of experiment

Number of experiment	Type of die	T_B, °C	T_C, °C
1	with the double-cone bottom of the welding chamber	360	340
2		400	340
3		400	400
4	with the flat-stepped bottom	360	340
5		400	400

Comparison of results was conducted not only for porthole dies with various types of weld chamber, but also with base variant "0" - extrusion with a long mandrel.

Measurement of surface temperature was being conducted with the help of the manual contact thermocouple; average temperature on a die exit was recalculated taking into consideration distance from the die to the place of measurement and outflow speed of a tube.

Samples for investigation of structure were prepared with using of electrolytic etching in the next solution: 20 ml of acetic acid, 5 g of picric acid, 20 ml of distilled water, 50 ml of ethanol.

 ISSN 1991-7848

Results and discussion. *The geometrical characteristics of tubes.* The values of a diameter and wall thickness of tubes are given in a fig. 2. Elastic deformation, out-of-contact plastic deformation and temperature expansion are the basic reasons of nonuniformity of tubes geometry and their deviation from nominal values.

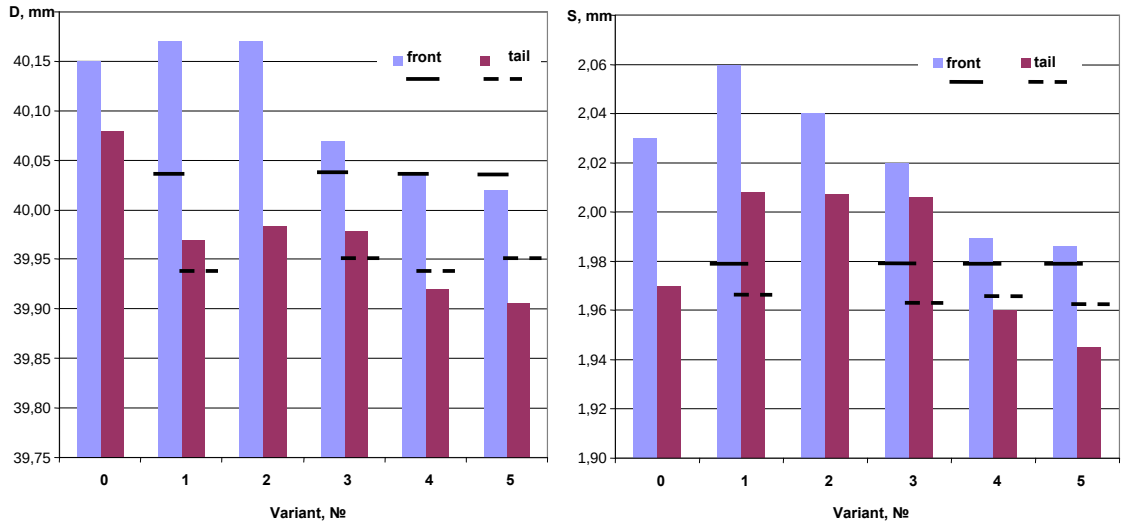


Figure 2 – Tube dimensions: *a* – diameter, *b* – wall thickness

Changing of mandrel and die dimensions due to elastic deformation was defined wit program COSMOSWorks for SolidWorks. Under extrusion pressure radiuses of die orifice and mandrel bearing reduced. Therefore decrease of distance between bearings of mandrel and die in radial direction at the maximal extrusion force was only 0,007 mm for the die set with flat-stepped die and 0,016 mm with conical die.

The analysis of results shows, that the diameter and wall thickness in the tail part is always less than in the front part of tube and to a great extent it caused by thermal expansion. The flat-stepped die allows extruding the tubes of smaller diameter and wall thickness than the conic die. The tubes produced through the flat-stepped die have in the front part of tube much smaller deviation of diameter caused by metal temperature. Wall thickness by using of the conical die is always more than expected value as a result of thermal expansion (on 0,01-0,08 mm), by using of flat-stepped die differs from expected thickness less than 0,01-0,02 mm.

As a whole, deviation of mean diameter and mean wall thickness from nominal value are not great. The allowable deviation for the examined size of tube according to ASTM B 107 for a wall thickness is 0,20 mm, for a diameter is 0,15 mm.

Extrusion force. Extrusion force for the examined tubes usually reached a maximum. The duration of the diagram part with the maximal

extrusion force reaches 1/3 of a billet length. For examined extrusion conditions it was not found essential influence of die’s type on the force. The more great influence has billet length, presence of metal in a die and tool temperature.

Temperature of tubes. Magnesium alloys cool fast (in comparison with aluminium) on air. As the tube temperature measurement is difficult at the die bearing, an experiment for definition of cooling rate on air was carried out.

After approximation of the obtained results about temperature change in time (in a range 60 s) the next equation was obtained:

$$T = 0{,}027\ t^2 - 4{,}634\ t + 490, \quad (1)$$

where T is temperature of tube surface (°C); t is time (s).

Cooling rate can be submitted as:

$$\Delta T/\Delta t = 0{,}3036 \exp(0{,}0058T), \quad (2)$$

where ΔT – change of temperature for the time interval $\Delta t = 1$ s.

Temperature of tube at the die bearing was determined using the equations (1) and (2) taking into consideration that the difference between temperature of shape's metal and environment in the die is not big (accepted 100°C), but at the outcome from the press (1 m from die bearing) already corresponds to conditions of above described experiment.

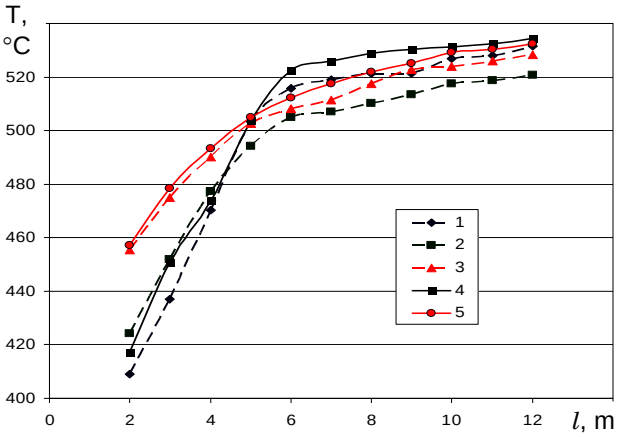


Figure 3 – Temperature changing along tube length

The corrected results of measurement of tube temperature are given on fig. 3. Temperature increase during extrusion with such extrusion ratio (50) is markedly great – 130-160°C (smaller values correspond to bigger billet temperature). Such values correspond with the results of works [1, 2].

The basic change of temperature (about 90 %) falls on a front part of tube that is appropriate to ram stroke that approximately equal to the container diameter.

During the extrusion through flat-stepped die tube temperature is higher, but insignificant (of some degrees).

Mechanical properties of tubes (fig. 4). Yield strength of tubes at the various extrusion conditions differs not considerably - within the limits of 2,5 %. Tensile strength is lower for tubes extruded through the flat-stepped die. At increase of billet’s temperature lead to little decrease the

 ISSN 1991-7848

tensile strength of tubes extruded through the conical die (within only 8 N/mm^2) and practically it does not change for the flat-stepped die. Tubes produced with the flat-stepped die have a higher elongation.

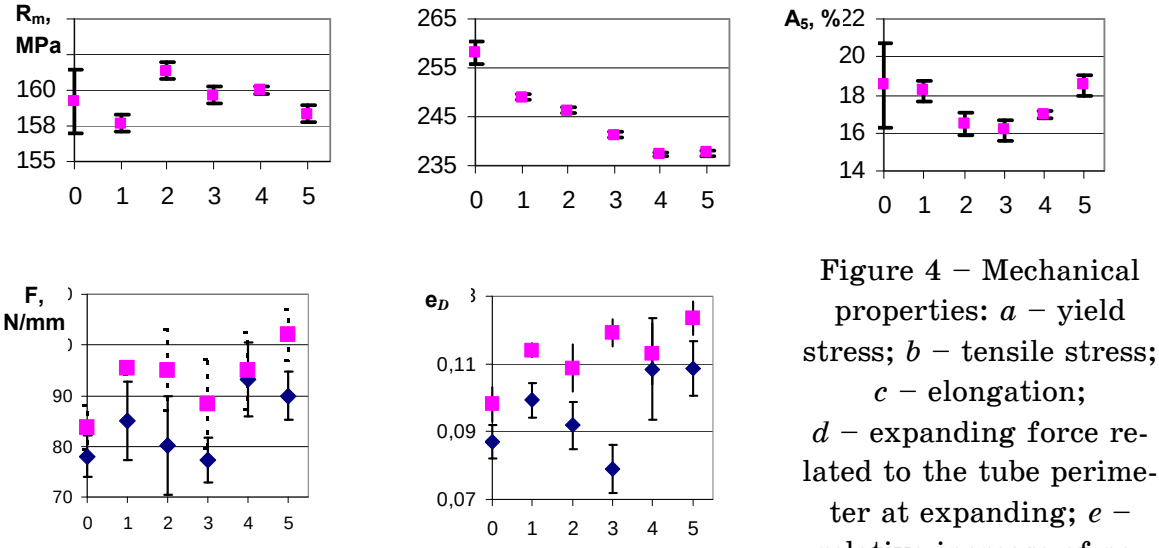


Figure 4 – Mechanical properties: *a* – yield stress; *b* – tensile stress; *c* – elongation; *d* – expanding force related to the tube perimeter at expanding; *e* – relative increase of perimeter; $e_D = \ln(D_1/D_0)$

As a whole the tubes received under above mentioned temperature-speed conditions demonstrate the tensile strength almost on the lower limit of requirements of DIN and ASTM and well higher elongation - on 60-120 %. However, it is necessary to take into account, that these tubes were produced without stretching for straightening, that normally lead to strengthening of tubes and decrease the elongation value.

The expanding tests characterize more objectively the strength of weld seam and a heat-affected zone than extension test. At this test expanding force related to the unit tube perimeter (fig. 4g), and the value of relative increase of perimeter (fig. 4d) are more for tubes extruded through the flat-stepped die. In a whole, these characteristics for welded tubes are not less than for seamless.

Structure of tubes' metal. The analysis of cross-section of tubes shows that there are layers with finer grain in depth up to 0,3 mm near outside and inside surfaces of tubes. Sometimes at an outside surface on depth about 50 μm lays a layer with larger grains. Such allocation can be explained by the greater work of deformation in in-contact layers and friction on the contact of surface layers with die and mandrel.

The longitudinal weld seam was found only in the sections from front part of tubes extruded by higher billet temperature (400 °C)

through the dies of both types. On an axis of a seam the size of a grain is more, than in a heat-affected zone.

In longitudinal section the structure of tubes can be characterized as equiaxed that was obtained from practically completed recrystallization. The grain size is given in table 2.

Table 2

The average grain size in various zones of tube wall section (longitudinal), μm

Layer	Number of variant					
	0	1	2	3	4	5
outside	5,3	11,9	12,9	14,1	14,6	15,7
middle	9,3	17,9	19,1	25,3	28,7	27,5
inside	6,6	17,4	18,9	21,3	24,9	25,3

In tubes extruded through the flat-stepped dies grain size is greater on 2-4 μm, and at the higher billet temperature the difference is smaller. The extrusion process through the conical die is more sensitive to billet temperature: by increase of T_B from 360 to 400 °C the grain size in the basic body of tube has increased on 30 %, whereas at extrusion through the flat-stepped die it has not changed practically.

Temperature of the container has an essential influence upon structure. So, the extrusion according variant "2" at increased temperature of a billet (400°C), but at the "cold" container (340 °C), provides grain size much closer to variant "1" with the cold billet (360°C), than to variant "3" with a hot billet and the hot container.

Quality of tube surface. Quality of tubes surface was estimated by such criteria as "colour" - darkening as a result of oxidation, as well as presence of weld seen on outside and inside tube surface. In table 3 are given these parameters for different variants and the place of crack's occurrence during expanding test is characterized.

The analysis of tab. 3 shows the follows:

- tube front is always less oxidized than the tail;
- at lower billet temperatures an inside tube surface is darker than outside, at higher T_B is on the contrary;
- on an outside tube surface the weld seam is not seen as a rule (except for a case of extrusion with the conical die at higher T_B);

 ISSN 1991-7848

Table 3

The characteristics of tube surface quality

#	Place in tube	Darkening of surface		Type of a seam and a heat-affected zone		Place of a crack during expanding		
		out-side	inside	outside	inside			
0	m	1	3	seamless		b	b	b
1	f	1	1	–	w.s. (2-3 mm)	b	b	b
	t	1	2	–	w.s. (5-8 mm)	es	ms	ms
2	f	1-2	2	–	w.s. (2-3 vv)	es	b	ms
	t	4	3	–	w.g.s.(3-5 / 0,5-2 mm)	b	b	es
3	f	1-2	2	w.s.(0,5-1 mm)	w.g.s.(2-4 / 0,5-1 mm)	ms	b	es
	t	3-4	2-3	–	w.g.s.(3-5 / 0,5-2 mm)	b	es	es
4	f	1	1-2	–	–	–	–	–
	t	1	1-2	–	–	–	–	–
5	f	1	1-2	–	w.s. (0,5-1 mm)	es	es	es
	t	3	1-2	–	–	–	–	–

Remark: "m" – middle; "f" – front; "t" – tail; "b" – body of a pipe; "es" – edge of seam; "ms" – middle of seam; w.s. – white strip, w.g.s. – white-grey strip (edge/centre width of seam), "–" = "not found"

• at extrusion through the flat-stepped die the seam on an inside surface is seldom shown, for a case of lower T_B (360 °C) it was not found out;

• at higher temperature of extruded metal, seam is more wide and gets white-grey colour instead of grey (white colour is a place where fine wrinkles occurred and roughness is much);

• sharp relationship of the place where crack occurred during expanding test was not found.

Conclusion

Dies with the flat-stepped bottom of welding chamber provides higher accuracy of tubes in comparison with conical. Diameter and wall thickness of tubes decreases from front to back part of tube at the use of both die types.

The basic change of temperature (about 90 %) falls on a front part of tube that is appropriate to ram stroke that approximately equal to the container diameter. During the extrusion through flat-stepped die tube temperature is higher, but insignificant (of some degrees).

Extrusion at the considered temperature-speed conditions allow to produce the tubes with relative high elongation value (on 60-120 % higher then required by ASTM B 107).

The mean grain size in the basic body of tube differs from 18 to 28 μm depending on extrusion mode. The longitudinal weld seam was found only in the sections from front part of tubes extruded by higher billet temperature (400 °C) through the dies of both types.

The welded seam on an internal surface is seldom shown also its width less at pressing through a plainly-step matrix. For a pressing case at lower temperature of preparation (360 °C) the welded seam visually is not found out.

On the basis of the received data the rational technological mode and geometry of the tool depending on requirements to mechanical properties, quality of a surface and structure of metal of pipes can be chosen.

Tube front is always less oxidized than the tail. At the extrusion through the flat-stepped die the seam on an inside surface is seldom shown, for a case of lower billet temperature (360 °C) it was not found out.

REFERENCES

1. Бах Ф.-В., Головко А.Н., Хассель Т. Особенности прессования труб из сплава системы Mg-Ca на вертикальном гидравлическом прессе // Металлургическая и горнорудная промышленность, 2005. № 1. – С. 48-52.
2. Bach Fr.-W., Hassel T., Golovko A.N. The Influece of the Chemical Composition and Extrution Parameters on the Mechanical Properties of Thin-Walled Tubes Made of Magnesium-Calcium Alloys // Сучасні проблеми металургії. Наукові вісті. Том 8. Пластична деформація металів. Дніпропетровськ: "Системні технології", 2005. – С. 379-384.
3. Mueller K.B. Direct and Indirect Extrusion of AZ31 // Magnesium Technology 2002. Ed. By H.I. Kaplan. TMS (The Minerals, Metals and Material Society), Penn. USA, 2002.
4. Sauerborn M., McQueen H.J. Extrusion modeling of AZ31 // Light Metals 99 / Ed. By M. Bouchard and A. Faucher. – MetSoc, 1999. – P. 549-562.

 ISSN 1991-7848

УДК 621.774.35.016.3

В.У. Григоренко І. В., Маркевич С.О., Філатов, С.В.Пилипенко

СИСТЕМА АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЕКТУВАННЯ ІНСТРУМЕНТУ СТАНІВ ХПТР

У статті описано підходи до розробки й систему автоматизованого проектування роликів, планок та оправок станів ХПТР, з застосуванням сучасних програмних продуктів та ПЕВМ.

В статье описано подходы к разработке и разработанную систему автоматизированного проектирования роликов, планок и оправки станов ХПТР, с использованием современных программных продуктов и ЭВМ.

The approaches to development as well as the developed system of the automated designing of rollers, plates and mandrel of the cold tube roller rolling mills with use of the modern soft ware and computers had been described.

Вступ.

При виробництві холоднодеформованих особливотонкостінних труб необхідно часто змінювати інструмент на стані ХПТР, так як об’єми замовленнь як правило невеликі.

Проблема. Зараз все більше для проектування використовуються нові комп’ютерні програми AVTOCAD, T-FLEX, та інші. Наприклад T-FLEX має встроєні математичні модулі, де можливо виконувати не тільки конструювання, а й розрахунки. Далі результати цих розрахунків можливо вивести у вигляді геометричних параметрів сконструйованого інструменту станів ХПТР.

Аналіз досліджень. Для процесу ХПТР вже створені комп’ютерні реалізації [1,2,3] визначення параметрів процесу й відповідних калібровок на базі відомих математичних залежностей опису процесу [4,5].

Невизначне питання. Систем САПР для проектування параметрів планок, роликів і оправок станів ХПТР до даних розробок по літературним матеріалам не існує.

Ціль розробки. Необхідно створити САПР проектування планок, роликів і оправок станів ХПТР, для кожного конкретного маршруту прокатки (САПР ХПТР).

Результати розробки. В системі T-FLEX було введено математичні модулі розрахунків геометричних, деформаційних і силових параметрів процесу ХПТР. Було сконструйовано (зроблені машинобудівні креслення) планки, ролика і оправки.

© В.У. ГРИГОРЕНКО І. В., МАРКЕВИЧ С.О., ФІЛАТОВ, С.В.ПИЛИПЕНКО, 2008.

САПР працює так, що після розрахункового визначення розмірів планок ролика і оправки (рис.1, 2), автоматично змінюється у масштабі їх розміри на машинобудівному кресленні.

Це дозволяє миттєво виконувати розрахунки і креслення інструменту для кожного конкретного маршруту прокатки.

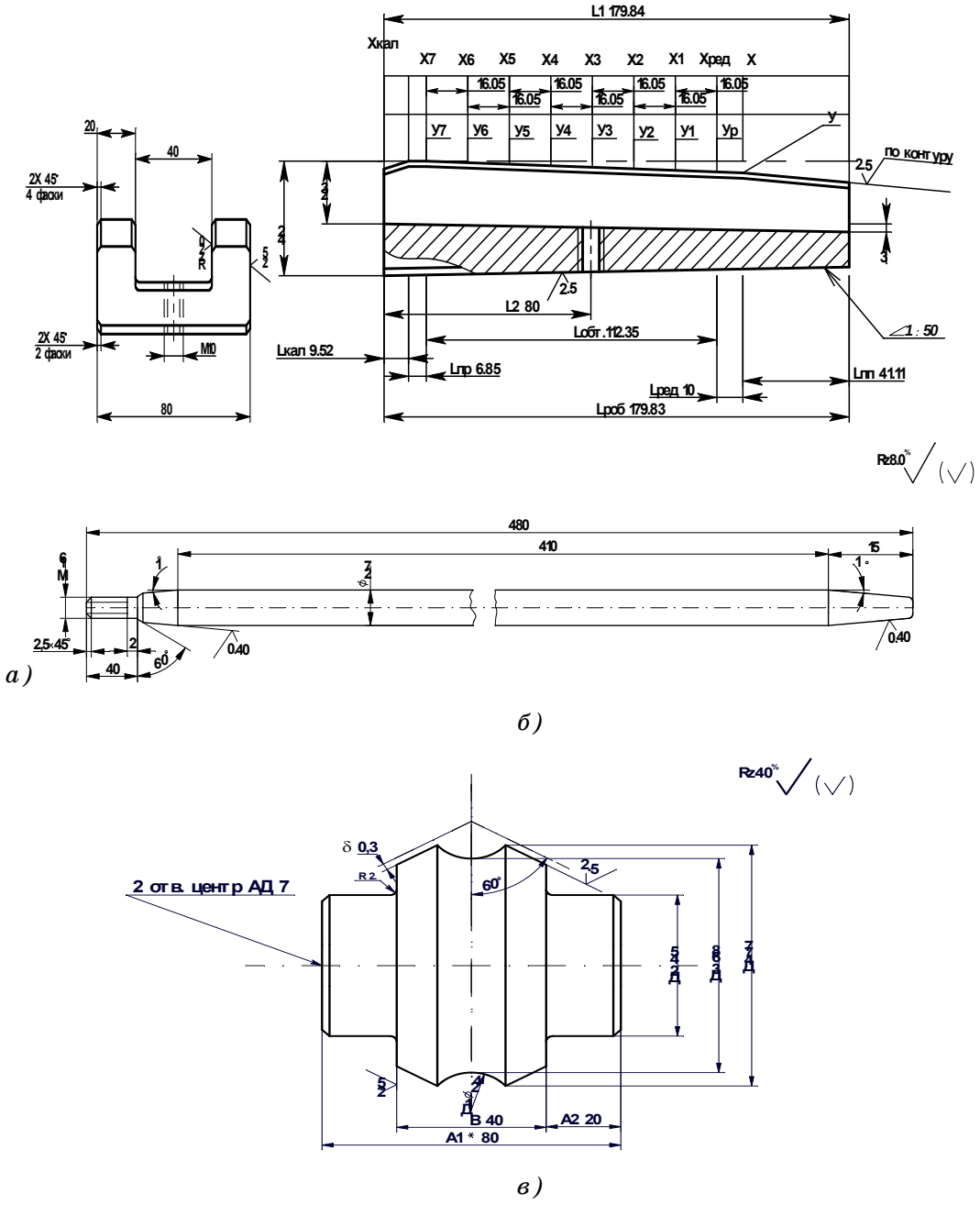


Рисунок 1 - Приклад інструмент стану ХПТР розробленого за допомогою САПР ХПТР: *а* – планка; *б* – оправка; *в* – ролик.

 ISSN 1991-7848



Рисунок 2 - Спрощена блок-схема роботи САПР ХПТР.

Висновки.

Використання САПР ХПТР для станів холодної прокатки труб значно прискорює проектування інструменту стану ХПТР для відповідних маршрутів та марок сталі. Також розроблена система дозволяє використовуючи програми «ХПТР – параметри» [2], «ХПТР – куліса» [3] проводити аналіз процесу прокатки та вибір раціональних.

Перспективи. Подібні розробки відкривають можливість широкого використання ЕОМ для розрахунку, проектування, аналізу і підбора раціональних параметрів процесу ХПТР для реальних маршрутів прокатки труб з конкретних марок сталей.

ЛІТЕРАТУРА

1. Маркевич І.В Математическая модель расчета параметров процессов холодной прокатки труб роликами и ее компьютерная реализация,: Тези доповідей міжнародної науково - технічної конференції, присвяченій 100 – річчю з дня народження С.З. Юдовича „Машини і пластична деформація металів”, стор.21
2. Григоренко В.У., Маркевич И.В. Анализ деформационных и силовых параметров процесса холодной периодической роликовой прокатки на базе разработанной компьютерной реализации его математического описания:„Системні технології - 2008”, Дніпропетровськ.
3. Маркевич И.В. Анализ осевых усилий в процессе холодной прокатки труб роликами на базе разработанной компьютерной реализации их расчета: Сборник статей по результатам международной научно-технической конференции «Информационные технологии в обработке давлением (исследование, проектирование и освоение процессов и машин)», г. Краматорськ.
4. Шевакин Ю.Ф., Сейдалиев Ф.С. Станы холодной прокатки труб:- М.: Металлургия , 1966. - 211 с.
5. Вердеревский В.А. Роликовые станы холодной прокатки труб – М.: Металлургия, 1992. - 240 с.

УДК. 621.774.35.016.3

Grigorenko V.U., Nagniy O.S., Khavkin G.O., TChub I.I.

THE EXPERIMENT-CALCULATION METHOD OF DEFINITION OF ACTUAL PARAMETERS OF COLD-PILGERLING PROCESS

Наведено експериментально-розрахунковий метод визначення реальних параметрів процесу ХПТ. Суть методу - виміри геометричних параметрів робочого конусу й твердості металу по довжині робочого конусу для наступних розрахунків деформаційних і силових параметрів процесу й "пружини кліті".

Приведен экспериментально-расчетный метод определения реальных параметров процесса ХПТ. Суть метода – замеры геометрических параметров рабочего конуса и твердости металла по длине рабочего конуса для последующих расчетов деформационных и силовых параметров процесса и "пружины клети".

The experimental calculation method for determination of the actual parameters of the cold-pilgering process is shown. The essence of the method lies in the metering of geometrics and hardness of metal along the working cone and in the successive calculations of deformation and power parameters and "stand springing".

Target setting. In account of many reasons the designed parameters of the process do not correspond to the actual one's [1]. Obtaining the actual parameters of the cold-pilgering process makes it possible to appraise the process and exercise adequate actions to avoid possible divergence of the planned mode.

Research analysis. The divergence of the parameters from designed ones during operation of an already tuned stand depends not only on deforming cold-pilgering tool placement [2], stand springing [3], wall-thickness and diameter variation, stress-strain properties and on feed and rotation as well. To adjust the roll-pass clearance the axial shift of a mandrel and the vertical shift of rolls is administered. The scientific researches carried out to neutralize springing of a stand's parts mainly propose to: increase stand's rigidity [4], consider stand springing at forward stroke of a stand [5], and at forward and reverse strokes of a stand [6], and consider springing of metal and mandrel [7].

Purpose of research. The experiment-calculation method for the appraisal procedure of the cold-pilgering process development, which is stipulated by the necessity of obtaining the actual values of the process parameters, including the value of stand springing.

Study review. The experiments have been carried out using cold-pilger rolling stand HPT-55 in working environment of Joint Stock Company "Dnipropetrovs'k Tube Works". For the experiment two regu-

© GRIGORENKO V.U., NAGNIY O.S., KHAVKIN G.O., TCHUB I.I. , 2008

 ISSN 1991-7848

lar examples of rolling of thin-walled 57×3.5→30×2.0 and thick-walled 57×7.5→30×5.0 tubes of steel 20 have been chosen.

In each checkpoint of the rolled tube's working cone geometrics and Brinel hardness level have been measured (HB_i). Then obtained data have been included in the calculation of the deformation and power parameters of the process.

Total stand springing can be calculated basing on the values of rolling force, which depends on experimentally obtained working cone geometrics and metal hardness in cone's checkpoints.

Forming of a mother-tube with thicker wall implies greater resistance (fig.1b). Calculation in "HPT- ekspertiza" system takes working cone sections that correspond to cone's pilgering pass. This corresponds to sections #4-10 (fig. 1) of the working cones 57×3.5→30×2.0 and 57×7.5→30×5.0 (fig. 2).

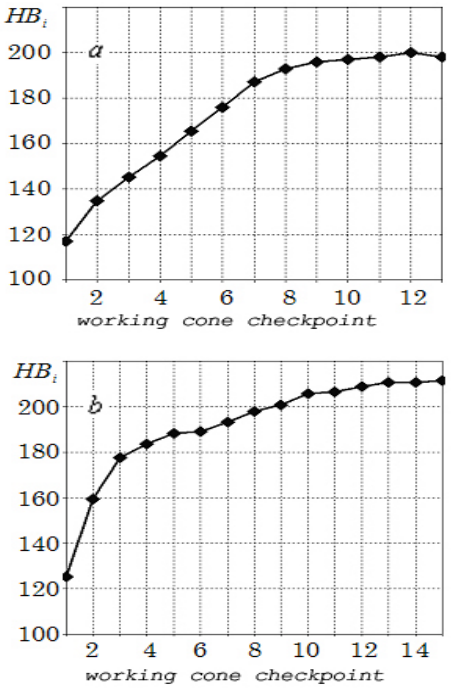


Figure 1 – Experimental data showing the Brinel hardness change along the working cone, steel 20, feed – 6 mm: *a* – tube-gage table 57×3.5→30×2.0; *b* – tube-gage table 57×7.5→30×5.0

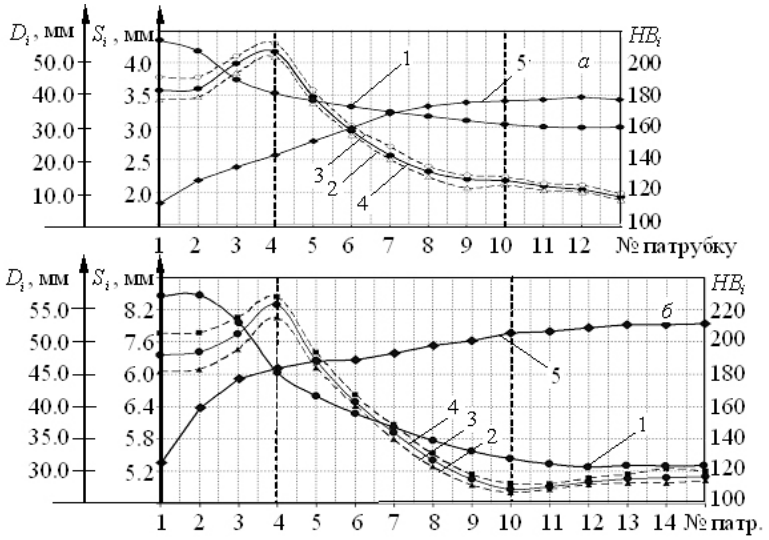


Figure 2 – Experimental data of the wall thickness and diameter measurements

Experimental measurements of the stand springing have been carried out by means of annealed brass strips rolling between roll ledges at the load and idle strokes of the stand, while cold-pilgering the cones 57×3.5→30×2.0 and 57×7.5→30×5.0, steel 20 (fig. 3).

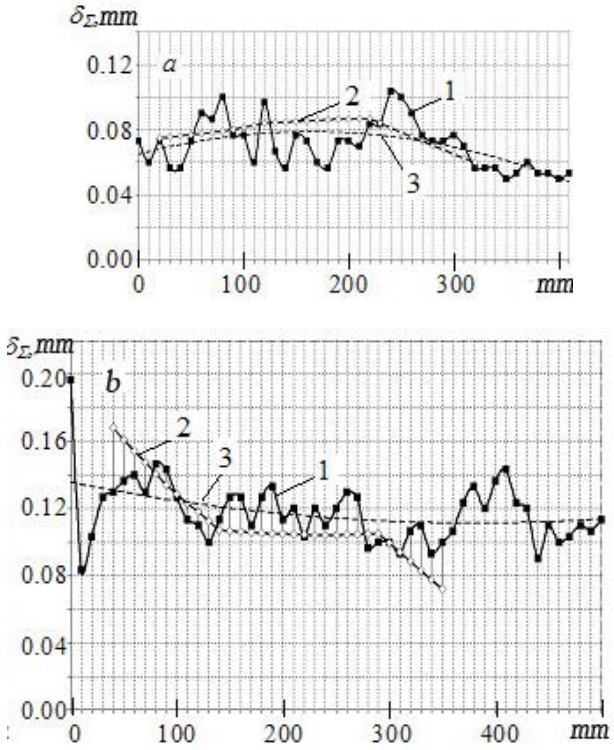


Figure 3 – Stand springing when rolling of tubes according to tube-gage table: *а* – 57×3.5→30×2.0; *б* – 57×7.5→30×5.0; 1 – experiment; 2 – calculation; 3 – line, approximating experimental data of the curve 1

 ISSN 1991-7848

The calculated definition of the parameters has been carried out basing on mathematical formulation in computer realization "HPT-ekspertiza" [3].

Recommendations and summary. The actual parameters of the tube geometrics, hardness and stand springing have been obtained by means of tube rolling using cold-pilger rolling stand HPT-55 in working environment of Joint Stock Company "Dnipropetrovs'k Tube Works". Based on these data the successful test of the HPT-ekspertiza" system has been carried out. In its turn, this proves the efficiency of using the mentioned above method for the definition of actual parameters of cold-pilger rolling of tubes.

REFERENCES

1. Калибровка и усилия при холодной прокатке труб. Шевакин Ю.Ф. – М.: Металлургия, 1963. – 212 с.
2. О влиянии параметров настройки инструмента на режим деформации при прокатке на станах ХПТ / Фролов Я.В., "Удосконалення процесів і обладнання обробки металів тиском в металургії і машинобудуванні". Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ – Тематический сборник 31.03.2002р. – С. 330 –334.
3. Экспертная оценка процесса холодной пильгерной прокатки труб / Григоренко В.У., Середа Б.П., Нагний О.С., Кругляк І.В. "Металургія". Збірник наукових праць. Запорізька державна інженерна академія, м. Запоріжжя – №13 21.02.2006р. – С. 80 – 86.
4. Станы холодной прокатки труб. / Гриншпун М.И., Соколовский В.И., М: "Машиностроение", 1967. – 240 с.
5. Методика расчета калировки станов ХПТ / Лашевич В.И., Яковлев В.В., Батист А.И. Сб.трубное производство Урала, Ю.У.К.И., вып. 3, 1974.
6. Режим деформирования рабочего конуса на станах холодной периодической прокатки труб с учетом упругих деформаций деталей клети. / В.У. Григоренко, О.С. Нагній, "Системні технології" – Регіональний міжвузівський збірник наукових праць, Національна металургійна академія України, м. Дніпропетровськ – №5‘(40)2005 – С. 75-81.
7. Фролов В.Ф., Данченко В.М., Фролов Я.В. Холодная пильгерная прокатка труб. - Дніпропетровськ: Пороги, 2005. – 255 с.

УДК 621.774.21:621.791.7

В.У. Григоренко С.В. Пилипенко

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗМІНИ РІЗНОСТІННОСТІ ТРУБИ ПРИ РОЗРАХУНКУ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ХПТ МЕТОДОМ З ПЕРВИННИМ ВРАХУВАННЯМ ПОШИРЕННЯ МЕТАЛУ

The experimental investigation of the influence of the method used for calculating parameters of the cold tube rolling process on the change in deviation of the tube wall thickness at initial account of the metal widening was described in the present work.

В даній роботі редставлено експериментальне дослідження впливу методу розрахунку параметрів процесу ХПТ з первинним урахуванням поширення металу на на зміну поперечної рызностынности труб.

В даной работе представлено єксперементальныэ исследования влияния метода расчета параметров процеса ХПТ с первичним учетом уширения металла на изменения поперечной разностенности труб.

Вступ

Холодна пільгерна валкова прокатка (процес ХПТ) відноситься до процесів періодичної прокатки. Вона широко використовується при виробництва труб з дорогих марок сталей та сплавів підвищеної якості по точності поперечного перетину [1].

Проблема. При прокатці труб з дорогих марок сталей та сплавів важлива не висока продуктивність а мінімалізація витратного коефіцієнта металу. Це в свою чергу пов'язане з методами розрахунку параметрів процесу і відповідних калібрувань, що забезпечують необхідну точність геометрії поперечного перетину труб.

Аналіз досліджень. Авторами цієї статті [2, 3], було розроблено метод розрахунку параметрів процесу ХПТ при первинному розподілі величини розвалки. На відміну від інших методів розрахунку параметрів процесу ХПТ [4, 5, 6], з ціллю отримання труб з очікуваною точністю товщини стінки, величина розвалки калібру та її розподіл вздовж конуса деформації являються первинно заданими. Розподіл величини розвалки по контрольним перетинам конуса деформації [2, 3] здійснюється за допомогою формули:

© В.У. ГРИГОРЕНКО С.В. ПИЛИПЕНКО, 2008

 ISSN 1991-7848

$$b_i = \frac{\left(\frac{b_0}{\left(\frac{1-e^{n\frac{i}{10}}}{1-e^{n}} \frac{b_0}{b_{10}} \right) + \left(\frac{1-e^{n\frac{i}{10}}}{1-e^{n}} \right)} \right)}{2} \qquad (1)$$

де: b_0 - розвалка в перетині валка який відповідає початку зони обтиску, b_{10} - розвалка в перетині наприкінці зони обтиску валка, n - коефіцієнт інтенсивності розподілу розвалки по довжині конуса розкатки, і - номер перетину.

Змінюючи коефіцієнт інтенсивності розподілу розвалки по довжині конуса деформації (n) ми маємо змогу отримати необхідну криву розподілу розвалки.

Режим обтиснення стінки в контрольних перетинах конуса деформації розраховується в залежності від величини розвалки (рис. 1), щоб отримати необхідний поперечний плин металу. З цією метою виведено відповідні залежності [2, 3], для прокатки на конусній оправці та на оправці з криволінійною твірною.

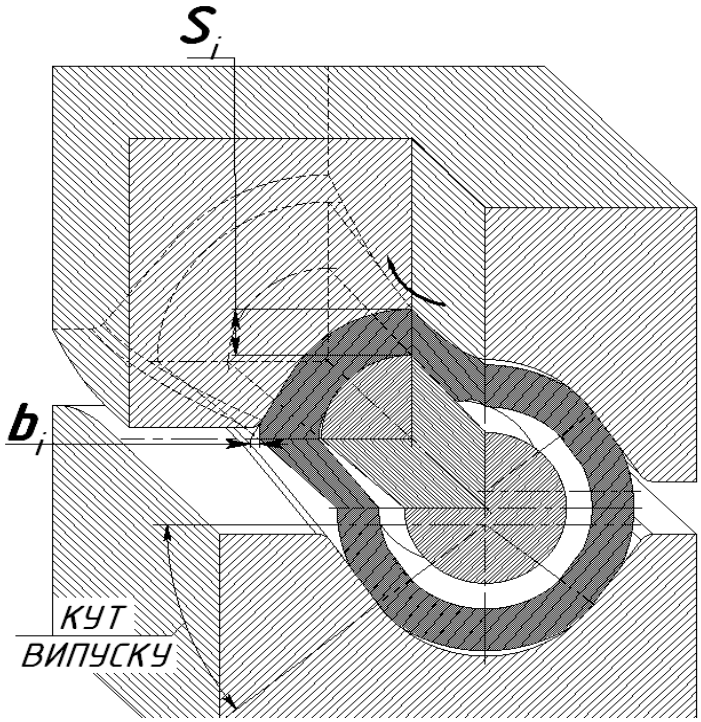


Рисунок 1 - Розріз миттєвого осередку деформації: S_i – товщина стінки в кінці миттєвого осередку деформації; b_i – розвалка калібру

Виділення невирішеного. Метод розрахунку параметрів процесу ХПТ з первинним урахуванням поширення металу являється нестандартним і потребує експериментальних досліджень.

Ціль роботи. В даній роботі поставлена задача дослідження впливу на зміну поперечної різностінності в процесі ХПТ при розрахунку параметрів процесу ХПТ і відповідної калібровки з первинним урахуванням поширення металу.

Викладення основного матеріалу. Для експериментальних досліджень вибрано маршрут 42,16х3,56-26,67х2,87. Прокатка велась на оправці з криволінійною твірною. Розвалка калібру в кінці зони деформації була рівною 0,1 мм (3,5% від товщини стінки труби), розвалка на початку конуса деформації була рівною 0,025Dз. Під час прокатки подача не перевищувала розрахункову максимально допустиму.

В результаті експерименту було виміряно 12 труб до та після деформації з обох кінців, з метою знаходження мінімальної та максимальної товщин стінки в перетинах. По цим значенням було порахована відносну різностінність до та після прокатки.

Результати розрахунків оброблено та зведено в полігон зміни абсолютних частот варіативного ряду максимальної різностінності [6, 7] (рис. 2).

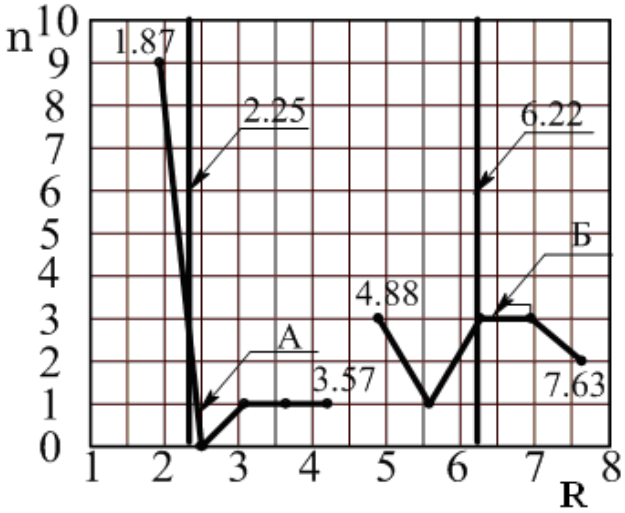


Рисунок 2 – Полігони абсолютних частот відносної різностінності труби до та після деформації при розрахунку параметрів процесу ХПТ з первинним урахуванням поперечного плину металу труби:

А – максимальна різностінність після прокатки; Б – максимальна різностінність до прокатки

 ISSN 1991-7848

Висновок

В результаті прокатки при розрахунку параметрів процесу ХПТ з первинним урахуванням поперечного плину металу труб має місце значне зменшення різностінності труби. Максимальна різностінність не перевищує 4% й вона в основному лежить в межах зробленої розвалки.

Перспектива. Розробки відкривають широкі можливості методу розрахунку параметрів процесу ХПТ з первинним урахуванням поперечного плину металу труби та доказує його ефективність.

ЛІТЕРАТУРА

1. Технология трубного производства / В.Н. Данченко, А.П. Коликов, Б.А. Романцев, С.В. Самусев. – М.: Металлургия, 2002. – 650 с.
2. Григоренко В.У., Пилипенко С.В. Математическая модель процеса валковой холодной прокатки труб основаная на исходном распределении ширины ручья по длине конуса раскатки и её компьютерная реализация // Удосконалення процесів і обладнання обробки металів тиском в металургії і машинобудуванні. Зб. наук. праць. - Краматорськ, 2007. - С. 445 - 449.
3. Григоренко В.У., Пилипенко С.В. Новый подход к определению калибровки инструмента станов холодной прокатки труб // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії - 2006. №1. – С77-79.
4. Шевакин Ю.Ф. Калибровка и усилия при холодной прокатке труб. – М.: Металлургия,1963. – 212 с.
5. Разработка интегрированой системы имитационного моделирования процеса прокатки труб на станах ХПТ / А.В. Полозный, В.П. Сокуренко, В.Д. Шевченко, Г.Ф. Ефремова // Производство труб и баллонов: Тематич. сб. научн. Трудов. ГТИ. – Днепропетровск: ГТИ, 1999. –С. 87-90.
6. Вольфович Г.В, Замощиков В.Я., та ін. Компьютерное моделированиє процеса холодной прокатки циркониевых труб-оболочек ТВЕЛ // Вопросы атомной науки и техники - 2003.- №3 – С.89-91.
7. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика. - М: Высшая школа, 2002. - 478 с.
8. Шенк Х. Теория инженерного эксперимента. – М: «МИР», 1972. – 381с

УДК 621.774.35.016.3

Григоренко В.У., Щербань К.В.

ЕКСПЕРЕМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ РАЗНОСТЕННОСТИ ТРУБ ПО ДЛИНЕ РАБОЧЕГО КОНУСА ПРИ ПРОКАТКЕ НА СТАНЕ ХПТР

Приведены исследования изменения поперечной разностенности на стане ХПТР 60-120. Получены статистические данные о разностенности используемой заготовки, готовых труб и характере изменения поперечной разностенности по длине рабочего конуса.

Приведені дослідження змінення поперечної різностінності на стані ХПТР 60-120. Отримані статистичні дані різностінності заготовки, що використовується, готових труб і зміни поперечної різностінності по довжині робочого конусу.

The explorations of variance in the transverse of variation in wall thickness on the HPTR 60-120 Mill are presented. Statistics on variation in wall thickness of used billets, tubes and behavior of the transverse of variation in wall thickness in length of working cone are received.

Введение

Процесс холодной периодической роликовой прокатки труб (процесс ХПТР) широко используется для получения особотонкостенных труб [1]. Величина поперечной разностенности – одна из основных характеристик качества труб.

Проблема. В рабочем конусе прокатки из поперечной разностенности трубы-заготовки формируется поперечная разностенность готовых труб. Важно знать закономерности изменения поперечной разностенности от трубы-заготовки до готовой трубы. Это необходимо для проектирования процесса.

Анализ исследований. В работах [2,3] для процесса ХПТР дан анализ и приведены данные о изменении разностенности труб в зоне редуцирования рабочего конуса. Имеются экспериментальные данные об изменении поперечной разностенности труб в зоне рабочего конуса в случае исходной разностенности равной 13%. Показано, что при такой исходной разностенности её снижение составило 2%. Однако для зоны обжатия стенки нет экспериментальных данных об изменении поперечной разностенности труб в случае средних и малых значений исходной разностенности.

Цель исследований. Поставлена задача получения экспериментальных данных о характере и величине изменения поперечной разностенности труб в процессе ХПТР в случае небольшой (6-8%) исходной разностенности труб.

© ГРИГОРЕНКО В.У., ЩЕРБАНЬ К.В. ,2008.

 ISSN 1991-7848

Результаты исследований. Для эксперимента использовали случай прокатки труб на стане ХПТР 60-120. Здесь редуцирование труб по диаметру незначительно и не влияет на процесс изменения поперечной разностенности. Выбрали трубы с исходным значением поперечной разностенности 5 ×11%. Трубы-заготовки получены со стана ХПТ 90. После чего была проведена расточка труб. Маршрут 119,1Ч4,1→114,3Ч3,05. Средняя поперечная разностенность 15-ти труб заготовок (таблица 1) составила 7.35%, а готовых труб -9,21% (таблица 2).

Таблица 1

Значения толщины стенки и разностенности труб-заготовок 119,0 ×4,1 мм

Номер трубы	Si															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	4.65	4.50	4.43	4.35	4.50	4.25	4.51	4.62	4.60	4.60	4.45	4.50	4.45	4.52	4.61	4.65
2	4.50	4.52	4.40	4.45	4.30	4.65	4.50	4.40	4.60	4.65	4.62	4.54	4.50	4.48	4.43	4.47
3	4.19	4.21	4.25	4.30	4.35	4.24	4.20	4.23	4.26	4.32	4.27	4.23	4.21	4.09	4.18	4.18
4	4.41	4.36	4.30	4.15	4.09	4.05	4.15	4.17	4.21	4.32	4.40	4.45	4.48	4.52	4.50	4.43
5	4.38	4.25	4.22	4.30	4.45	4.48	4.46	4.35	4.27	4.38	4.46	4.36	4.33	4.28	4.33	4.35
6	4.25	4.33	4.28	4.28	4.30	4.35	4.45	4.48	4.42	4.45	4.32	4.20	4.16	4.21	4.19	4.24
7	4.60	4.62	4.65	4.75	4.85	4.68	4.62	4.60	4.55	4.52	4.59	4.54	4.49	4.43	4.46	4.58
8	4.45	4.43	4.32	4.18	4.21	4.27	4.29	4.48	4.49	4.50	4.27	4.40	4.50	4.51	4.48	4.44
9	4.45	4.64	4.51	4.56	4.67	4.60	4.40	4.38	4.25	4.37	4.45	4.52	4.36	4.42	4.44	4.46
10	4.51	4.53	4.48	4.40	4.35	4.47	4.48	4.60	4.59	4.62	4.60	4.59	4.56	4.53	4.54	4.52
11	4.48	4.42	4.39	4.32	4.33	4.37	4.37	4.40	4.43	4.44	4.45	4.49	4.50	4.53	4.54	4.51
12	4.40	4.36	4.41	4.44	4.50	4.49	4.53	4.54	4.55	4.58	4.51	4.48	4.42	4.45	4.41	4.38
13	4.26	4.27	4.33	4.37	4.39	4.44	4.45	4.48	4.42	4.34	4.33	4.30	4.28	4.32	4.27	4.27
14	4.49	4.45	4.41	4.34	4.25	4.21	4.15	4.18	4.23	4.24	4.32	4.37	4.42	4.46	4.47	4.47
15	4.24	4.32	4.33	4.41	4.44	4.48	4.51	4.58	4.61	4.54	4.48	4.43	4.39	4.30	4.26	4.26

Номер трубы	Scp	Smax	Smin	S=Smax-Smin	R=S/Scp	Rcp
1	4.51	4.65	4.25	0.40	0.089	0.0735
2	4.50	4.65	4.30	0.35	0.078	
3	4.23	4.35	4.09	0.26	0.061	
4	4.31	4.52	4.05	0.47	0.109	
5	4.35	4.48	4.22	0.26	0.060	
6	4.31	4.48	4.16	0.32	0.074	
7	4.60	4.85	4.43	0.42	0.091	
8	4.39	4.51	4.18	0.33	0.075	
9	4.47	4.67	4.25	0.42	0.094	
10	4.52	4.62	4.35	0.27	0.060	
11	4.44	4.54	4.32	0.22	0.050	
12	4.47	4.58	4.36	0.22	0.049	
13	4.35	4.48	4.26	0.22	0.051	
14	4.34	4.49	4.15	0.34	0.078	
15	4.41	4.61	4.24	0.37	0.084	

Таблица 2

Значения толщины стенки и разностенности готовых труб размером 114,3 ×3,05 мм

Номер трубы	Si															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	3,03	3,02	3,00	2,98	2,96	2,95	2,95	2,92	2,90	2,87	2,85	2,81	2,90	2,97	3,05	3,11
2	3,14	3,08	3,05	3,05	3,07	3,15	3,22	3,19	3,20	3,22	3,18	3,00	2,90	3,11	3,15	3,16
3	2,91	2,90	2,95	2,98	3,01	3,00	3,01	3,08	3,12	3,12	3,10	2,95	2,99	2,97	2,95	2,88
4	3,15	3,20	3,20	3,18	3,15	3,10	3,06	3,01	2,90	2,85	2,93	2,95	2,98	2,99	3,05	3,07
5	2,96	3,08	3,06	3,00	2,98	2,93	3,01	3,05	3,08	3,13	3,14	3,17	3,08	3,05	2,98	2,91
6	2,87	3,00	3,12	3,18	3,10	3,05	3,05	3,02	3,07	3,09	3,12	3,18	3,15	3,13	3,12	3,03
7	3,00	3,03	3,04	3,07	3,09	3,13	3,15	3,14	3,08	3,06	3,10	3,11	3,14	3,17	3,10	2,85
8	2,85	2,85	2,90	2,93	2,95	2,97	3,03	3,06	2,98	2,80	2,95	3,06	3,04	3,01	2,99	2,90
9	3,05	3,11	2,90	2,83	2,85	2,87	2,91	2,92	2,94	2,96	2,99	3,02	3,05	3,05	3,10	3,12
10	2,81	2,85	2,93	2,95	2,98	3,01	3,05	3,06	3,04	3,03	3,00	2,96	2,90	2,86	2,84	2,79
11	3,00	3,03	3,07	3,10	3,10	3,08	3,06	3,05	3,02	3,01	2,97	2,96	2,95	2,92	2,90	2,91
Номер трубы	Si															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
12	3,12	3,14	3,10	3,08	3,11	3,07	3,03	2,98	2,90	2,95	3,01	3,05	3,08	3,07	3,09	3,11
13	2,98	3,01	3,03	3,10	3,06	3,10	3,07	3,07	3,06	3,05	2,89	2,87	2,89	2,93	2,93	2,96
14	3,03	2,98	2,90	2,84	2,80	2,78	2,86	2,89	2,90	2,95	2,99	2,98	3,00	3,02	3,04	3,07
15	3,10	3,09	3,06	3,03	3,02	2,97	2,97	2,95	2,94	2,90	2,88	2,87	2,82	2,87	2,93	2,99

Номер трубы	Scp	Smax	Smin	S=Smax-Smin	R=S/Scp	Rcp
1	2,95	3,11	2,81	0,30	0,102	0,0921
2	3,12	3,22	2,90	0,32	0,103	
3	3,00	3,12	2,88	0,24	0,080	
4	3,05	3,20	2,85	0,35	0,115	
5	3,04	3,17	2,91	0,26	0,086	
6	3,08	3,18	2,87	0,31	0,101	
7	3,08	3,17	2,85	0,32	0,104	
8	2,95	3,06	2,80	0,26	0,088	
9	2,98	3,12	2,83	0,29	0,097	
10	2,94	3,06	2,79	0,27	0,092	
11	3,01	3,10	2,90	0,20	0,066	
12	3,06	3,14	2,90	0,24	0,079	
13	3,00	3,10	2,87	0,23	0,077	
14	2,94	3,07	2,78	0,29	0,099	
15	2,96	3,10	2,82	0,28	0,095	

 ISSN 1991-7848

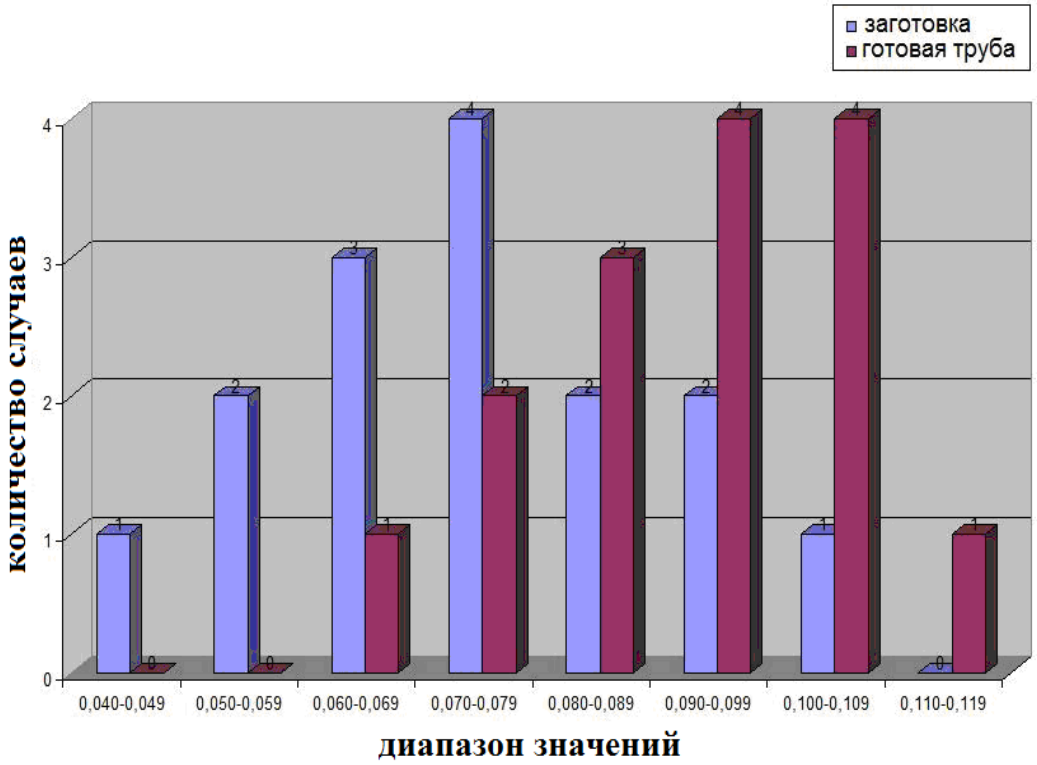


Рисунок 1 – Изменение поперечной разностенности в процессе ХПТР, маршрут 119,1×4,1→114,3×3,05

Из диаграммы видно, что диапазон разностенности готовых труб сместился в большую сторону по отношению к заготовке. Для исследования этого изменения разрезали рабочий конус на четырнадцать частей и замерили стенку труб в шестнадцати точках поперечного сечения (таблица 3)

Таблица 3

Изменение толщины стенки по длине рабочего конуса

Номер сечения	Si															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	4,16	4,14	4,17	4,19	4,14	4,20	4,12	4,04	4,14	4,28	4,26	4,25	4,21	4,14	4,17	4,26
2	4,36	4,31	4,42	4,35	4,30	4,35	4,36	4,22	4,31	4,35	4,30	4,34	4,34	4,33	4,37	4,46
3	4,44	4,49	4,45	4,37	4,32	4,36	4,33	4,31	4,33	4,34	4,23	4,28	4,32	4,37	4,42	4,43
4	4,32	4,38	4,29	4,38	4,32	4,28	4,25	4,23	4,18	4,15	4,14	4,21	4,26	4,30	4,29	4,32
5	4,12	4,09	4,06	4,15	4,17	4,18	4,23	4,29	4,30	4,23	4,29	4,30	4,24	4,16	4,14	4,15
6	4,09	4,03	3,97	3,99	4,03	4,09	4,15	4,16	4,21	4,15	4,11	4,09	4,05	4,03	3,99	4,06
7	3,97	3,91	3,88	3,88	3,83	3,75	3,71	3,74	3,76	3,81	3,88	3,94	3,91	3,94	3,96	3,97
8	3,63	3,60	3,56	3,50	3,54	3,63	3,70	3,75	3,76	3,74	3,71	3,70	3,67	3,64	3,65	3,63
9	3,50	3,51	3,56	3,54	3,56	3,53	3,50	3,45	3,38	3,33	3,30	3,31	3,33	3,36	3,42	3,45

10	3,27	3,26	3,26	3,18	3,21	3,26	3,33	3,35	3,38	3,43	3,38	3,38	3,36	3,29	3,28	3,27
11	3,20	3,22	3,23	3,28	3,31	3,34	3,36	3,36	3,34	3,33	3,27	3,30	3,21	3,15	3,10	3,13
12	3,21	3,27	3,30	3,33	3,27	3,21	3,15	3,09	3,07	3,11	3,17	3,19	3,20	3,21	3,20	3,21
13	3,24	3,24	3,16	3,15	3,15	3,13	3,09	3,11	3,13	3,19	3,29	3,23	3,30	3,33	3,29	3,27
14	3,15	3,21	3,23	3,21	3,22	3,24	3,20	3,17	3,15	3,08	3,05	3,09	3,11	3,17	3,15	3,21

Номер сечения	Scp	Smax	Smin	S=Smax-Smin	R=S/Scp
1	4,18	4,28	4,04	0,24	0,057
2	4,34	4,46	4,22	0,24	0,055
3	4,36	4,49	4,23	0,26	0,060
4	4,27	4,38	4,14	0,24	0,056
5	4,19	4,30	4,06	0,24	0,057
6	4,08	4,21	3,97	0,24	0,059
7	3,87	3,97	3,71	0,26	0,067
8	3,65	3,76	3,50	0,26	0,071
9	3,44	3,56	3,30	0,26	0,076
10	3,31	3,43	3,18	0,25	0,076
11	3,26	3,36	3,10	0,26	0,080
12	3,20	3,33	3,07	0,26	0,081
13	3,21	3,33	3,09	0,24	0,075
14	3,17	3,24	3,05	0,19	0,060

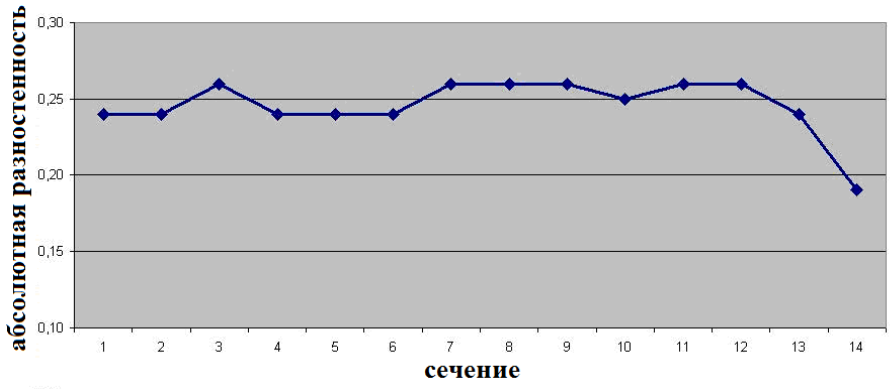


Рисунок 2 – Изменение абсолютной разностенности по длине рабочего конуса

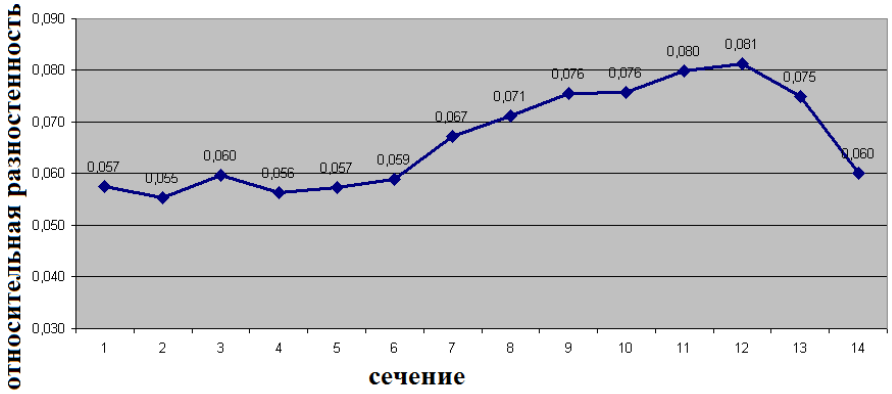


Рисунок 3 – Изменение относительной разностенности по длине рабочего конуса

ISSN 1991-7848

Абсолютная разностенность при прокатке трубы-заготовки с исходной малой разностенностью 6% в зоне обжатия рабочего конуса практически не изменилась (рис.3). Уменьшение абсолютной разностенности на 0.05 мм в конце рабочего конуса видимо связано с калибровкой в зоне калибрования, но основным показателем качества является относительная разностенность. По мере прокатки относительная разностенность несколько увеличилась, так как толщина стенки уменьшается.

Вывод

Полученные впервые эксперементальные данные по изменению поперечной разностенности труб в процессе ХПТР для случая прокатки трубы-заготовки с малой поперечной разностенностью показали, что в этом случае в зоне обжатия стенки абсолютная разностенность не изменяется и происходит незначительный рост относительной разностенности.

Перспектива. Полученные данные могут быть использованы при проектировании процесса холодной периодической роликовой прокатки с требуемым уровнем качества по поперечной разностенности труб.

ЛИТЕРАТУРА

1. В.Н. Данченко, А.П Коликов, Б.А. Романцев, С.В. Самусев. Технология трубного производства. –М. Металлургия, 2002 – 650 с.
2. Григоренко В.У., Данченко В.Н., Миленин А.А. Исследование снижения поперечной разностенности труб при редуцировании в условиях поперечной периодической роликовой прокатки труб. // Системные технологии. – 2003 - №6(29) –с. 140-148.
3. Григоренко В.У. Исследование изменения толщины стенки при редуцировании. Металлургическая и горная промышленность. -2003. №4. с 77-78.

УДК 621.774.37

Данченко В.Н., Бояркин В.В., Дыя Х.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ТРУБ ВЫСОКОЙ ТОЧНОСТИ НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Обоснованы и предложены усовершенствованная технология прокатки и методики расчета параметров профилирования холодной прокаткой в четырехвалковых калибрах, что обеспечивает повышение точности профильных труб и ресурсосбережение.

Обґрунтовано та запропоновано удосконалену технологію прокатки і методики розрахунку параметрів профілювання холодною прокаткою в чотирьохвалкових калібрах, що забезпечує підвищення точності профільних труб і ресурсозбереження.

Improvement of the technology and methods of calculation of parameters of shaping in four-roll calibres have been offered and is proved. It provides increase of accuracy of shaped pipes and resources saving.

Введение

В настоящее время возрастает потребность в профильных трубах высокой точности прямоугольного сечения с соотношением сторон преимущественно от 1 до 1,5 из углеродистых сталей и алюминиевых сплавов. Такие трубы изготавливают преимущественно холодным профилированием, в том числе в линии трубоэлектросварочных агрегатов (ТЭСА). Предварительный анализ показал, что в мировой практике для получения таких труб используются ТЭСА с многоклетевыми профилирующими группами (4–5 клетей) с четырехвалковыми калибрами (ЧВК), где вертикальные валки являются неприводными.

Проблема. Однако в Украине часть действующих ТЭСА оснащены многоклетевыми профилирующими группами с двухвалковым калибром. Практика показывает, что на таких станах невозможно получать профили с высокой точностью размеров поперечного сечения. На станах, оснащенных клетями с ЧВК, технология продолжает оставаться недостаточно рациональной. В частности, число проходов, размеры и форма калибров при прокатке конкретного профиля определяются с помощью многочисленных опытных прокаток.

Анализ исследований. Несмотря на проведенные исследования [1], для уменьшения прогиба сторон профиля стараются использовать завышенное число проходов, что негативно влияет на технико-экономические показатели процесса. В работе [2] представлена однопроходная схема получения прямоугольных труб проталкиванием через неприводную клеть с ЧВК. Недостатками такой схемы являются:

© ДАНЧЕНКО В.Н., БОЯРКИН В.В., ДЫЯ Х., 2008

 ISSN 1991-7848

необходимость достаточного подпора со стороны формующей группы ТЭСА, что делает невозможным широкое распространение такого способа (например, для получения труб малых сечений); использование дополнительных операций при получении труб с малыми радиусами закруглений углов; опасность продольного искривления готовой трубы, что вызывает необходимость дополнительной правки.

Неисследованные вопросы. Современные решения в области холодного профилирования описаны в работе [3] и др. Видно, что при производстве квадратных и близких к квадратным труб с применением клетей с ЧВК используют минимум три прохода, причем, в большинстве случаев, в первых двух используют фасонные однорадиусные калибры. Такой подход представляется оптимальным с точки зрения предупреждения чрезмерной вогнутости граней выходящего профиля. Достаточное теоретическое обоснование формы, размеров калибров и других технологических факторов при этом отсутствует.

Цель. Исходя из вышесказанного, для удовлетворения отечественной и экспортной потребности в прямоугольных (с отношением сторон от 1 до 1,5) профильных трубах с высокой точностью размеров поперечного сечения, соответствующей мировым стандартам и ГОСТ 13663–86 повышенной точности, а также минимальной продольной кривизной необходима разработка теоретически обоснованной схемы производства. Схема может быть реализована в линии ТЭСА и в линии специализированных профильных станов.

Результаты исследований. Предлагаемая схема профилирования (рис.1) предполагает использование минимального числа клетей с ЧВК (двух), причем валки чистовой клети имеют гладкую бочку. В случае реализации такой схемы на отдельно стоящем стане рекомендуется установка задающей клети дуо для обеспечения гарантированного захвата. Уменьшение числа проходов позволяет использовать освободившиеся клети для обеспечения прямолинейности готовой трубы без дополнительной правки. Снижается, а в ряде случаев исключается, необходимость применения турголовок.

Как видно из рис. 1, валками с фасонными однорадиусными ручьями оснащена только одна клеть. Такой подход, в случае рациональных размеров калибра, не отразится на качестве готовой трубы [1]. Для разработки калибровки инструмента применялся пакет конечноэлементных программ FORGE2 компании Transvalor [4]. Расчет течения металла и полей напряжений, степени деформации, деформаций и температур проводится на основе вязкопластической модели деформируемого тела. Деформация по клетям распределялась в процентном соотношении 75/25. Целью было получение готовой прямо-

угольной трубы с соотношением сторон 1 и 1,3 и с минимально возможными радиусами закругления в углах [5]. Для определения параметров фасонного калибра проведена серия численных расчетов. При этом в качестве базовых принимались следующие технологические параметры: материал заготовки – Сталь 20 и сплав AlMgSi0,6, который по химическому составу и свойствам близок к сплаву АД31, широко используемому при производстве труб и профилей; начальная температура материала, инструмента и окружающей среды – 20°С; коэффициент трения – 0,2; скорость инструмента – 20 мм/с, что соответствует скорости прокатки 5 м/с. Значением отношения диаметра D к толщине стенки S заготовки варьировали от 18 до 45. Задача решалась при следующих допущениях: деформированное состояние – плоское, процесс неизотермический, инструмент является недеформируемым. Напряжение текучести является функцией степени и скорости деформации, а также температуры. Из-за симметрии профиля производился расчет по четверти поперечного сечения.

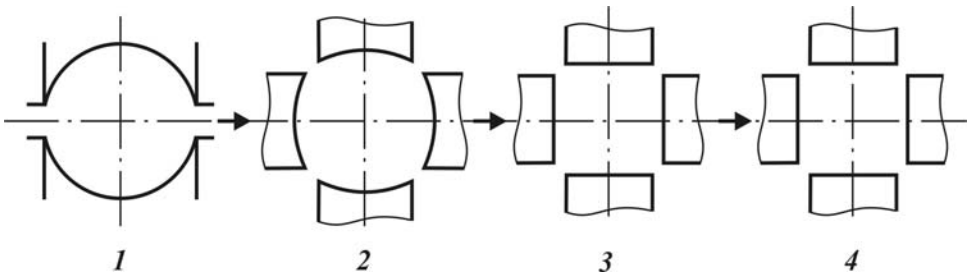


Рисунок 1 – Предлагаемая схема профилирования труб: 1 – задающая клеть дуо (используется в случае отдельностоящего стана); 2 – клеть с четырехвалковым калибром с валками, имеющими фасонные ручьи; 3 – клеть с четырехвалковым калибром с валками, имеющими гладкую бочку; 4 – отделочная неприводная клеть с четырехвалковым калибром

По полученным данным были построены зависимости параметров калибра и заготовки. После обработки программой Microsoft Excel97 полученных данных были определены следующие зависимости:

для алюминиевых сплавов $H_1=A\times(0{,}012\times D/S+1{,}0368)$, $R^2=0{,}9911$,
$R_1=R_з/(0{,}0083\times D/S+0{,}1692)$, $R^2=0{,}9836$;

для углеродистых сталей $H_1=A\times(0{,}011\times D/S+1{,}0377)$, $R^2=0{,}9904$,
$R_1=R_з/(0{,}0082\times D/S+0{,}1125)$, $R^2=0{,}9753$;

где H_1 – высота калибра клети №2 по дну ручья, A – сторона готовой профильной трубы, D – наружный диаметр заготовки, S – толщина стенки заготовки, R_1 – радиус ручья валка клети №2, $R_з$ – радиус заготовки, R^2 – величина достоверности аппроксимации.

 ISSN 1991-7848

По приведенным соотношениям возможно определение параметров калибра при производстве квадратных труб (высота и ширина калибра равны). Анализ результатов моделирования показал, что по предлагаемой схеме возможно устойчивое обеспечение качества труб в диапазоне отношений сторон от 1 до 1,3.

Расчет параметров калибра для прямоугольных труб с отношением сторон A/B=1,3 рекомендуется производить по следующим зависимостям:

для алюминиевых сплавов
$$H_1 = B\times(0{,}012\times D/S + 1{,}0368),$$
$$B_1 = A\times(0{,}012\times D/S + 1{,}0368),$$
$$R_{1Г} = R_З /(0{,}0083\times D/S + 0{,}1692),$$
$$R_{1В}=0{,}94\times R_З/(0{,}0083\times D/S + 0{,}1692),$$

для углеродистых сталей
$$H_1 = B\times(0{,}011\times D/S + 1{,}0377),$$
$$B_1 = A\times(0{,}011\times D/S + 1{,}0377),$$
$$R_{1Г} = R_З /(0{,}0082\times D/S + 0{,}1125),$$
$$R_{1В}=0{,}94\times R_З/(0{,}0082\times D/S + 0{,}1125),$$

где H_1 – высота калибра клети №2, B_1 – ширина калибра клети №2, $R_{1Г}$ – радиус ручья горизонтального приводного валка клети №2, $R_{1В}$ – радиус ручья вертикального неприводного валка клети №2.

Следует отметить, что при производстве прямоугольного профиля большая сторона A расположена в калибре горизонтально.

Размер D заготовки определяется при минимально возможном радиусе закругления в углах, из следующих полученных соотношений:

для алюминиевых сплавов $D/A = 0{,}0017\times D/S+1{,}2009,$

для углеродистых сталей $D/A = 0{,}0012\times D/S+1{,}2064.$

Для получения этих зависимостей проводилась отдельная серия численных расчетов, в которых заготовка обжималась до момента появления складок на внутренней поверхности угловых участков труб [6]. При исследованиях использовалось допущение, что все изменения периметра идет в утолщение стенки в углах труб. Для того, чтобы иметь возможность получать квадратные и прямоугольные трубы с радиусом закругления углов более минимального допустимого, предполагается уменьшать диаметр заготовки, как это показано в работе [6]. Ширина ручья и диаметры валков рассчитываются по методике, приведенной в работе [7], используя полученные величины радиусов ручьев, высоты и ширины калибра.

Разработанная схема использована в условиях Государственного предприятия "Научно-производственный центр "Электротермия" Института электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины на трубоэлектросварочном стане типа20-76 при производстве профильных труб с размерами сторон 25×25 мм и 30×25 мм в диапазоне толщин стенок от 1 до 1,5 мм из углеродистой стали при Rн/S=1 (Rн – наружный

радиус закругления углов профиля). Использование разработанной схемы профилирования позволяет получать трубы согласно DIN 2395/2 и трубы повышенной точности по ГОСТ 13663–86, уменьшить в 2–2,5 раза расход валков и сократить время на перевалку и настройку клетей.

Выводы

1. Применение современных методов математического моделирования, в частности метода конечных элементов, позволяет разрабатывать методики расчета технологических параметров процесса холодного профилирования.

2. Разработана и опробована в промышленных условиях новая схема производства квадратных и прямоугольных труб холодной прокаткой в клетях с четырехвалковым калибром, позволяющая получать профильные трубы высокой точности на уровне мировых стандартов.

3. Данная схема производства может быть использована как при разработке нового оборудования, так и при модернизации существующих ТЭСА и специализированных профильных станов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пинчук В.М. Исследование формоизменения и разработка эффективных технологических схем изготовления прямошовных профильных труб высокой точности в линии трубоэлектросварочного агрегата: Автореф. дис... канд. техн. наук: 05.16.05 / ДМетИ. - Днепропетровск, 1987. - 17 с.
2. Новая технология производства профильных труб высокой точности в линии трубоэлектросварочного агрегата / Калинушкин П.Н., Фурманов В.Б., Пинчук В.М., Шлосберг Л.М. // Прогрессивные технологии и оборудование для трубного производства: Сб. науч. тр. ВНИТИ. - М.: Металлургия, 1987. - С. 66-69.
3. Нехаев Н.Е., Илюкович Б.М., Алексеев А.Ю., Нехаев К.Н. Технологии производства профильных труб. // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: Темат. зб. наук. пр. ДДМА. - Краматорськ. - 2003. - С. 87-92.
4. Бояркин В.В., Дыя Х., Данченко В.Н. Применение математического моделирования для анализа процесса холодного профилирования квадратных и прямоугольных труб в четырехвалковых калибрах // Теория и практика металлургии. - 2004. - №5. - С. 46-48.
5. Бояркин В.В., Данченко В.Н., Стефаник А. Определение минимального допустимого радиуса закругления в углах квадратных и прямоугольных труб // Металл и литье Украины. - 2004. - №6. - С. 36-38.
6. Бояркин В.В., Никулин Э.В. Влияние диаметра заготовки на параметры профилирования квадратных и прямоугольных труб // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: Темат. зб. наук. пр. ДДМА.- Краматорськ. - 2003. - С. 207-209.
7. Данченко В.Н., Сергеев В.В., Никулин Э.В. Производство профильных труб. - М.: Интермет Инжиниринг, 2003. - 222 с.

 ISSN 1991-7848

УДК 621.774.37:621.774.8

Данченко В.Н., Вышинский В.Т., Воронько В.Г.,
Рахманов С.Р., Болгарин П.М., Журавлёв А.В.

ЗАДАЧИ И НАПРАВЛЕНИЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СТАНОВ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ ТРУБ РОЛИКАМИ

Актуальними стають задачі модернізації станів ХПТР у напрямку розширення як їхніх технологічних можливостей (одержання труб сортаменту станів ХПТ), так і підвищення продуктивності. Заміна механізму, що подає та повертає заготовку з допомогою мальтійського хреста комплексом, що містить епіцикличні перетворювачі підвищить рівень мобільності стану ХПТР; зниження матеріалоємності лінії головного привода і підвищення навантажувальної здатності стану може бути досягнуте при спільному використанні механізмів Латира і Чебишева.

Актуальными становятся задачи модернизации станов ХПТР в направлении расширения как их технологических возможностей (получения труб сортамента станов ХПТ), так и повышения производительности. Замена распределительно-подающего механизма с мальтийским крестом поворотно-подающим комплексом, содержащем эпициклические преобразователи повысит уровень мобильности стана ХПТР; снижение материалоёмкости линии главного привода и повышение нагрузочной способности стана может быть достигнуто при совместном использовании механизмов Латира и Чебышева.

Problems of HPTR mills’ modernization in an expansion direction of their technological possibilities (pipes’ reception of an assortment of HPT mills) and increase of productivity are becoming more actual. Replacement of the distributive-submitting mechanism with the Maltese cross by the turning-submitting complex, containing epicyclical converters, will raise level of mobility of HPTR mill; masses’ decrease in line of the main drive and increase in loading ability of a mill can be reached by the use of Latir’s and Chebishev’s mechanisms.

Ведение

Способ холодной пилигримовой прокатки труб, изобретенный как альтернатива волочению для малопластичных материалов находится в постоянном развитии. Наиболее интенсивное развитие способа происходило в период с 1950 по 1995 годы и было связано с высокой потребностью мировой промышленности в холоднодеформированных металлических трубах. В мире определились два основных производителя станов ХПТ: германская фирма Mannesmann -Meer (ныне SMS Demag) и Электростальский завод тяжёлого машиностроения (ЭЗТМ), Россия.

Фирма SMS Demag, начавшая выпуск станов ХПТ в 1935 году, к нас-тоящему времени является мировым лидером по технологическим

© ДАНЧЕНКО В.Н., ВЫШИНСКИЙ В.Т., ВОРОНЬКО В.Г., РАХМАНОВ С.Р., БОЛГАРИН П.М., ЖУРАВЛЁВ А.В., 2008

параметрам, техническому уровню и качеству изготовления станов ХПТ. С начала производства по 1996 г. эта фирма выпустила 447 станов различных типо-размеров для прокатки труб наружным диаметром от 4 до 200 мм, с толщиной стенки от 0,3 до 25 мм. ЭЗТМ с начала производства (1958 г.) по 1996 г. выпустил 200 станов ХПТ, в том числе уникальные станы ХПТ250 и ХПТ450. Оба производителя станов изготавливали их как для внутреннего пользования, так и на экспорт.

Возрастающие требования к геометрическим параметрам труб, их прочностным характеристикам, жаропрочности и устойчивости к воздейст-вию агрессивных сред (в том числе и сопротивление воздействию радиа-ции высоких уровней) привело в начале 60-х годов к возникновению тако-го направления холодной пилигримовой прокатки как способ холодной прокатки труб роликами (ХПТР). Станы для реализации способа ХПТР были разработаны ВНИИМЕТМАШ и предназначены для прокатки тонко-стенных и особо тонкостенных труб.

По оценкам специалистов на трубопрокатных, металлургических и машиностроительных заводах СССР работало несколько сотен станов ХПТ и ХПТР. Из них на предприятиях Украины (заводы, образовавшиеся на базе Никопольского Южнотрубного, Нижнеднепровский трубопрокатный, Днепропетровский трубный, Артёмовский завод по обработке цветных метал лов и др.) функционирует более 200. Подавляющее большинство станов, эксплуатируемых на заводах Украины, произведены НПО ЭЗТМ (ныне ОАО ЭЗТМ) и АЗТМ. Не менее половины из этого количества составляют станы роликового типа.

Способ и оборудование для его реализации, оказывая взаимовлияние друг на друга, находятся в постоянном развитии. Так, увеличение быстроходности станов повлекло за собой корректировку технологии прокатки в связи с существенным изменением теплового баланса на рабочем конусе. Появилась возможность частично использовать «эффект теплой деформации». При этом пришлось отказаться от применения смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ) в виде водной эмульсии и перейти к масляным СОЖ с повышенной температурой кипения, что значительно повысило технологические возможности способа. Увеличение же длины хода валков (применение кольцевых калибров с углом разворота валков до 360°) и, следовательно, длины рабочей части ручья создали благоприятные условия для увеличения деформации металла за проход и повышения точности труб.

На станах ХПТР кинематически реализована возможность значительного уменьшения диаметра рабочего инструмента, что позволяет изготавливать трубы со стенкой до 0,15 мм. Однако при этом профиль ручья, образованный роликами, ограничивает абсолютную де-

 ISSN 1991-7848

формацию по диаметру (до 2,0...2.5 мм), и рабочий ход клети используется всего лишь на 60% его длины. Это приводит к тому, что производительность станов ХПТР не превышает 10...20 м/час. Применение двухрядного сепаратора позволило увеличить деформацию по диаметру до 3,0...3,5 мм, при этом повышается как точность прокатываемых труб, так и производительность (до 20...40 м/час). Такие показатели были приемлемы при решении задач, возникавших в недрах военнопромышленного комплекса, где себестоимость продукции не являлась определяющим фактором существования технологии.

В настоящее время резко снизилась потребность в тонкостенных и особотонкостенных трубах, и в связи с этим огромное количество станов ХПТР практически простаивают. В тоже время возросла необходимость получения мелких партий труб широкой номенклатуры, в том числе и тонкостенных. В связи с этим становятся актуальными задачи модернизации станов ХПТР в направлении расширения как их технологических возможностей (получения труб сортамента станов ХПТ), так и повышения производительности (до 100...130 м/час).

Валковая клеть, расширяя технологические возможности станов ХПТР, может способствовать решению этих задач. Так, валковая клеть, разработанная для стана ХПТР 15-30 и эксплуатируемая на СМНПО им. М.В. Фрунзе обеспечивает возможность прокатки труб со стенкой до 0,3 мм, с деформацией по диаметру до 16 мм и производительностью до 50...60 м/ час. Освоено производство прецизионных труб размером 30х0,4 мм и производство труб сортамента стана ХПТ-32 по маршрутам: 38х3-20х2,0; 24х2-10х1 из углеродистых и нержавеющих марок сталей.

Дальнейшее повышение производительности может быть обеспечено коренным изменением организации работы стана. Для этого стан ХПТР должен быть оснащён системой загрузки и подачи заготовки в очаг деформации без прерывания основного технологического процесса – воздействия инструмента на обрабатываемое изделие. Система торцевой загрузки и механизм подачи, функционирующий с совмещением операции возврата исполнительных органов в исходное положение, ликвидируют паузы в процессе, составляющие до 30...40% машинного времени работы стана.

Следует отметить, что при изготовлении ста-нов ХПТ и ХПТР стихийно была применена модуль-ная технология, что обеспечивало не только существенное уменьшение затрат на их создание, но и возможность приспособления к изменяющимся условиям [1, 2].

На рис. 1 представлена оптимальная схема агрегата для холодного пильгерования труб. В состав системы «машина для изготовления изделий способом холодного пильгерования» входят следующие узлы:

приёмный стол 1; задний 2 и передний 3 зажимы стержней; промежуточный цепной толкатель 4; линия главного привода 5, включающая в себя электропривод и устройство возвратно-поступательного перемещения клети (валковой обоймы); устройство 6 периодической подачи обрабатываемого изделия в очаг деформации; линия 7 поворота системы «заготовка - готовая труба», устройство 8 разделения готового изделия на мерные длины и стол выдачи 9.

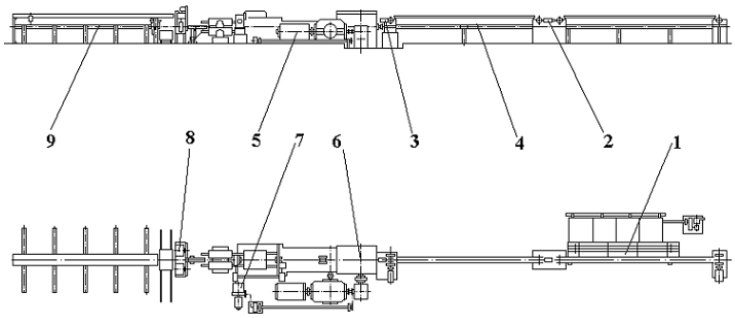


Рисунок 1 - Схема стана холодной пилигримовой прокатки труб

Замена распределительно-подающего механизма с мальтийским крестом поворотноподающим комплексом содержащем эпициклический преобразователь [3, 4], обеспечит возможность плавного регулирования величин подач и углов поворота не только в заднем положении хода клети, но и в переднем, причём в любых комбинациях реализации выходных параметров их функционирования, повысит уровень мобильности стана ХПТР, что, несомненно, приведёт к повышению его конкурентоспособности.

Материалоёмкость линии главного привода может быть существенно уменьшена при совместном использовании механизма Латира и прямила Чебышева. Такой механизм [5, 6] представлен на рис. 2. Подвижная клеть 1 сферическими узлами 2 одной стороной связана с подвижными колёсами 3, установленными на кривошипных валах 4, а другой – с рычажно-опорным механизмом 5. Габариты зубчатых передач внутреннего зацепления с передаточным отношением 1:2, осуществляющих преобразование вращательного движения валов кривошипов 4 в возвратно-поступательное клети 1, не превышают величину её хода. Элементы этого решения были испытаны в производственных усло-

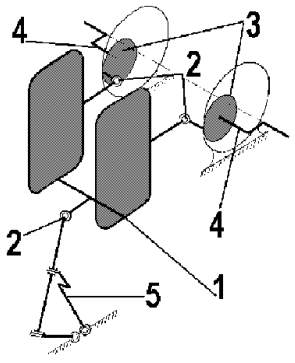


Рисунок 2 - Малогабаритный приводной механизм перемещения клети

 ISSN 1991-7848

виях на станах ХПТ-32 и ХПТР 15-30. Использование фирмой MDM одного из элементов этого решения –механизма Латира (зубчатой передачи внутреннего зацепления с передаточным отношением 1:2) в совокупности с системой гори-зонтального грузового уравновешивания в приводе стана KPW18HMR позволило обеспечить его быстроходность до 350 мин$^{-1}$.

Следует отметить, что применяемые фирмой MDM системы грузового уравновешивания лишь частично решают эту важную задачу, а значит и не в состоянии минимизировать энергопотребление при производстве изделий холодным пильгерованием. Полное решение было получено при использовании присоединяемых непосредственно к подвижной клети пневматических уравновешивающих устройств(ПУУ), мобильность системы управления работы которыми позволяет не только исключить воздействие динамических добавок на элементы линии главного привода, но и при рациональном переуравновешивании расширить техноло-гические возможности агрегата[7].

Весьма перспективным является решение этой задачи при использовании другого присоединяемого механизма – прямильного устройства П.Л. Чебышева. Многовариантность (бесчисленное множество решений) предостав-ляет конструктору при принятии решения возможность выбора по различным критериям: сравнительное значене масс подвижных звеньев присоединяемого механизма; уровень культуры изгото-вления и обслуживания; общая металоёмкость присоединяемого механизма; исполнительные габариты и т.д.

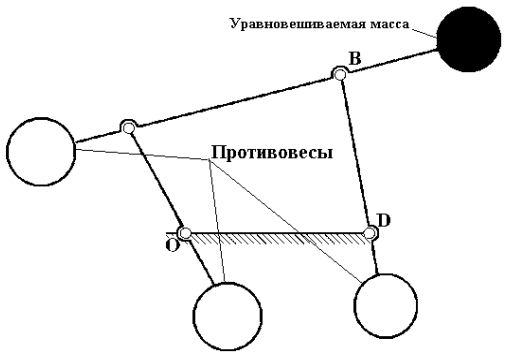


Рисунок 3 - Использование прямильного механизма П.Л. Чебышева для уравновешивания подвижных масс линии главного привода стана ХПТР

Так, в ПУУ, разработанных для станов ХПТР 15-30 СМНПО им. М.В. Фрунзе масса присоединяемых к клети звеньев составляет 0,1...0,15 значения массы клети, тогда как общая материалоёмкость (корпуса цилиндров, опорные узлы, рамная конструкция для связи с фундаментом стана, установка системы управления и т.д.) превысила трёхкратное её значение. Рациональное использование количества и способа размещения противовесов в свободном пространстве станины под клеть позволяет выполнить рычажное уравновешивающее устройство, материалоёмкость которого не будет превышать массу подвижной клети.

Выводы

В настоящее время снизилась потребность в тонкостенных и особотонкостенных трубах в тоже время возросла необходимость получения мелких партий труб широкой номенклатуры, в том числе и тонкостенных. Валковая клеть, расширяя технологические возможности станов ХПТР, может способствовать решению этих задач.

Дальнейшее повышение производительности может быть обеспечено коренным изменением организации работы стана. Для этого стан ХПТР должен быть оснащён системой загрузки и подачи заготовки в очаг деформации без прерывания основного технологического процесса.

Замена распределительно-подающего механизма с мальтийским крестом поворотно-подающим комплексом, содержащем эпициклический преобразователь, обеспечит возможность плавного регулирования величин подач и углов поворота не только в заднем положении хода клети, но и в переднем, причём в любых комбинациях реализации выходных параметров их функционирования; повысит уровень мобильности стана ХПТР, что приведёт к повышению его конкурентоспособности.

Материалоёмкость линии главного привода может быть существенно уменьшена, а динамические показатели его работы могут быть улучшены при совместном использовании механизма Латира и прямил Чебышева.

ЛИТЕРАТУРА

1. Протасов А.В. Применение модульных технологий в металлургическом машиностроении // Тяжёлое машиностроение. - 1999. – №5. - С. 7-8.
2. Совершенствование технологии и оборудования для холодной пилигримовой прокатки труб / В.Н. Данченко, Я.В. Фролов, В.Т. Вышинский // Сталь. - 2003. - № 4. - С. 48-54.
3. Конструкция, ремонт и обслуживание станов холодной прокатки труб // Л.А. Кондратов, Ю.Б. Чечулин и др. – М.: Металлургия, 1994. – 352 с.
4. А.с. № 532413 СССР, МКИ В 21 В 21/04. Подающее устройство стана холодной прокатки труб / В.Г. Воронько, Г.П. Воронько, С.Н. Кожевников и др. (СССР). - № 2163378/22-02; Заявл.29.07.76; Опубл. 25. 09. 76, Бюл. № 39. - 3 с.
5. А.с. № 531574 СССР, МКИ В 21 В 21/00.Привод клети стана холодной прокатки труб / А.С. Ткаченко, В.Т. Вышинский и И.В. Мураш (СССР).- № 2101542/22-02; Заявл.03.02.75; Опубл. 15. 10. 76, Бюл. № 38 -6 с.
6. А.с. №1152136 СССР, МКИ В 21 В 21/00. Клеть стана холодной прокатки труб./ А.С. Ткаченко, Л.А. Сафонов и В.Т. Вышинский (СССР).-№ 3516215/22-02; Заявл.02.12.85; Опубл. 07. 04. 85, Бюл. № 13 -6 с.

 ISSN 1991-7848

УДК 621.774.

Коликов А.П.

СОВРЕМЕННОЕ ПРОИЗВОДСТВО СТАЛЬНЫХ ТРУБ В РОССИИ ДЛЯ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

Приведені результати аналізу виробництва сталевих труб в Росії без магістральних трубопроводів.

Приведены результаты анализа производства стальных труб в России для магистральных трубопроводов.

Results of analysis of the steel tubes manufacturing for the main pipe-lines in Russia had been presented.

Введение

В настоящее время производственные мощности по выпуску стальных труб в мире оцениваются примерно в 90 млн.т и объединяют более 500 трубных компаний, имеющих более чем 900 производственных площадок [1]

Как и во всей черной металлургии, лидером в производстве стальных труб является Китай с устойчиво высокими темпами роста (более 12%) за последние годы, что позволило за 5 лет удвоить производство труб в этой стране, достигнув уровня выпуска ~ 22 млн.т в год

Доля сварных труб в общем объеме их выпуска в Китае, России, Германии, Франции находится на одном уровне (53-58%), что свидетельствует о рациональной структуре производства труб в России.

Современное трубное производство в России. Традиционно трубное производство в России рассматривается отдельной подотраслью в черной металлургии, выпуская наиболее технологически сложную продукцию и в1990 году в России производилось ~ 12 млн. т стальных труб в год. Однако в годы перестройки производство труб снизилось до 3 млн.т. Начиная с 2000 г. производство труб в России начало расти, особенно в период 2005-2007 г.г. производство труб росло высокими темпами. В настоящее время Россия является крупнейшим мировым производителем и потребителем стальных труб, занимая 3 место после Китая и Японии (табл.1)

Таблица 1.

Производство и потребление стальных труб в России, тыс.т [2]

Показатели	Производство, тыс. т по годам				
	2003	2004	2005	2006	2007*
Производство	6134	6034	6695	7898	8700
Экспорт	1122	1553	1682	1508	1400
В том числе:					
дальнее зарубежье	657	1037	1078	776	600
СНГ	465	516	604	732	800

© КОЛИКОВ А.П., 2008.

Импорт	1018	1213	1035	1381	1600
В том числе:					
дальнее зарубежье	269	647	349	415	550
СНГ	749	566	686	966	1050
Потребление	6030	5694	6048	7771	8900

Примечание:* оценка по результатам работы за 9 месяцев 2007 г.

В 2006 году производство труб выросло на 17,7%, в том числе по трубам нефтяного сортамента: сварным большого диаметра на 30,0%, обсадным – на 23,5%, насосно-компрессорным – на 17,3%, бурильным – на 18,8%, нефтепроводным электросварным – на 32 %. Следует отметить, что в 2006- 2007 г.г. производство труб выросло значительно на всех ведущих трубных заводах, что связано с реализацией ряда крупных трубопроводных проектов по трубам большого диаметра.

2. Производство сварных труб большого диаметра для магистральных газопроводов.[4]

Магистральный трубопроводный транспорт является важнейшей составляющей топливно-энергетического комплекса России. По магистральным трубопроводам перемещается 100% добываемого газа, 80% добываемой нефти, более 20% продукции нефтепереработки. ***Протяженность российских магистральных трубопроводов в 2005 г. превышает 221 тыс.км,*** из которых 153 тыс. км - это газопроводные магистрали, свыше 48 тыс.км – это нефтепроводы; более 20 тыс. км – используются для перемещения нефтепродуктов [3]. Система магистральных трубопроводов России начала создаваться более 50 лет назад. Из 180 трубопроводов, которые эксплуатируются в настоящее время, только 9 газопроводов и 3 нефтепровода были построены в прошлом десятилетии. Свыше 65% газопроводов введены в строй до 1980 г. и более половины магистральных нефтепроводов были построены до 1970 г.

По экспертным оценкам в ремонте или замене нуждаются ~ 75 тыс. км магистральных газо- и нефтепроводов из труб диаметром 1020 – 1420 мм. Даже при увеличении срока эксплуатации труб большого диаметра до 50 лет (задача над которой работает Газпром) ***потребность в трубах*** на реконструкцию трубопроводов ***возрастет в ближайшие 10 лет до 2 млн. т. в год.***

3. ***Новый этап развития трубопроводного транспорта в России.*** Расположение главных районов добычи нефти и газа на Севере, Сибири, Дальнем Востоке и о.Сахалин , а основных потребителей – в Центре и на Западе России обусловливает необходимость сооружения сети мощных подземных магистральных трубопроводов большой протяженности.

 ISSN 1991-7848

Новому этапу развития трубопроводного транспорта положило начало сооружение системы каспийского трубопровода (КТК), газопровода «Голубой поток », «Заполярное-Уренгой», «Балтийской нефтепроводной системы».Основным сортаментом, принятым Газпромом и нефтяными кампаниями в качестве базового для строительства большинства магистральных газопроводов являются трубы диаметром 1420 мм и толщиной стенки до 30 мм классов прочности К60(Х70)–К70(Х90). В проектах Газпрома и крупнейших нефтяных компаний (Транснефть и др.) на ближайшую перспективу предусматривает применение труб из стали класса прочности Х70 (К60), Х80 (К65), диаметром 1420, 1220 мм, с толщиной стенки до 40 мм, длиной до 18 м, рассчитанных на рабочее давление 9,8-11,8 МПа, с трехслойным наружным антикоррозионным полимерным и внутренним гладкостным покрытиями.

В настоящее время реализуется новая программа проектирования и строительства крупных российских, межконтинентальных и трансконтинентальных современных трубопроводных систем – это высоконагруженных электросварных конструкций, работающих в экстремальных условиях под действием внутреннего давления и внешних неблагоприятных условиях: при низкой температуре окружающей среды, общей коррозия и стресс-коррозия, которая развивается при сложном взаимодействии механических и электрохимических факторов.

Анализ развития мировой инфракструктуры перспективного потребления труб большого диаметра (до 2010 г.) показывает рост объемов строительства трубопроводов, который составляет 89,9 тыс. км, при этом доля России и СНГ составляет 18,8 тыс.км (21%), т.е. более 10 мл.т [5]

В связи с этим перед металлургами России стоит важнейшая задача: создание и освоение промышленного производства ***труб большого диаметра*** **(ТБД)** с повышенным комплексом механических и технологических свойств, которые предназначены для строительства новых перспективных магистральных трубопроводов: ***Североевропейский газопровод***, ***нефтепровод «Восточная Сибирь – Тихий океан, газопровод Ямал – Центр и др.*** [4,6]

Североевропейский газопровод будет состоять из наземной (900 км) и подводной (1200 км) частей. Наземная часть трубопровода рассчитана на давление газа 100 атмосфер и сваривается из труб диаметром 1420 мм, толщиной стенки до 32 мм класса прочности К60; под-

водная часть сваривается из труб диаметром 1220 мм с толщиной стенки до 33-36 мм класса прочности Х70.

Нефтепровод «Восточная Сибирь – Тихий океан» общей протяженностью 4200 км и рассчитана на рабочее давление 75 атмосфер; для строительства нефтепровода требуются трубы диаметром 1067 и 1220 мм с толщиной стенки от 22 до 27 мм классов прочности от К56 до К70.

При этом планируется переход на международные стандарты: Det Norske Veritas (DNV) - *для подводных трубопроводов*; ISO, API - *для сухопутных трубопроводных участков.*

Газопровод «Ямал - Центр» протяженностью 1074 км рассчитан на давление 11,8 МПа (120 атм.) и сваривается из труб диаметром 1420 мм с толщиной стенки 24, 9-36,7 мм класса прочности К65 (Х80) с нормативной ударной вязкостью при минимальной температуре эксплуатации 250 Дж/см^2.

Для подводных морских участков трубопроводов, имеющих рабочее давление до 25 МПа, будут применяться так называемые ***«балластные»*** трубы других диаметров с трехслойным защитным покрытием тела трубы, на которое наносится бетон определенной толщины и сверху еще дополнительно наносится полиэтиленовая оболочка (рис.1)

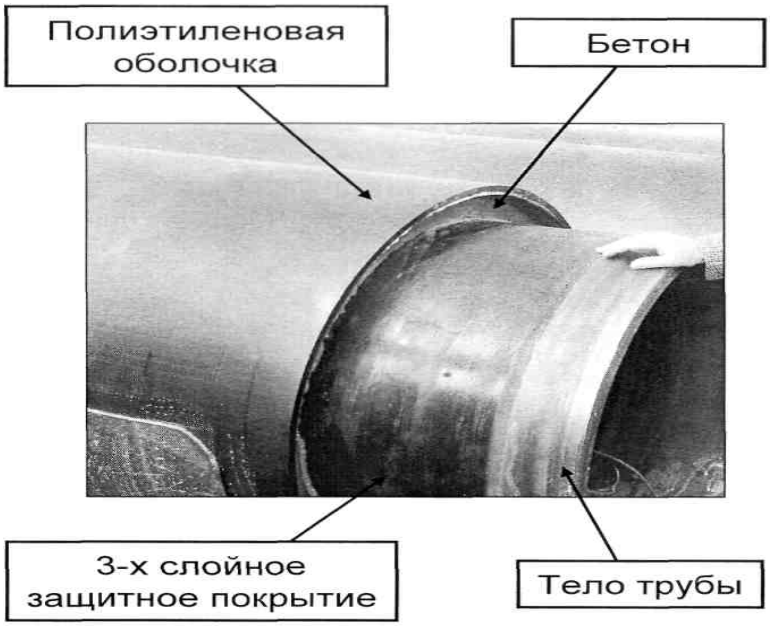


Рисунок 1 - Общий вид балластной (обетонированной) трубы.

Таким образом, потребность в трубах для строительства новых газо- и нефтепроводов возрастет до 1,5-2 млн. т. труб в год, а реаль-

 ISSN 1991-7848

ная потребность в трубах большого диаметра в ближайшие годы в России может составить до 4 млн. т. в год и запланированные инвестиции ~ 15 млрд. долларов США.

Выводы

Для обеспечения потребности в сварных прямошовных трубах большого диаметра – 1420 мм с толщиной стенки до 40 мм для в России создан ряд современных проектов, среди которых можно выделить следующие наиболее крупные работы, проводимых в настоящее время металлургическими предприятиями и трубными компании ОМК, ТМК, ЗАО «ЧТПЗ» и ЗАО «ИТЗ»

• ЗАО «Объединенная металлургическая компания» провело работы по реконструкции трубоэлектросварочного стана «530-1020» в ОАО «Выксунский металлургический завод» с целью расширения сортамента и организации производства отечественных сварных прямошовных труб диаметром до 1420 мм с повышенными эксплутационными характеристиками для строительства новых и капитального ремонта действующих магистральных трубопроводов [3,7].

В 2006 году на ВМЗ была изготовлена первая в России опытная партия сварных прямошовных труб большого диаметра для подводных трубопроводов по стандартам норвежской компании DNV, по которым будут строиться трубопроводы “Североевропейский газопровод”, Штокмановского месторождения и др.[3].

• ОАО «Северсталь» в июле 2006 года закончило строительство в ЗАО «Ижорский трубный завод» трубоэлектросварочного цеха по производству сварных прямошовных труб, применяемых для строительства магистральных газопроводов, диаметром до 1420 мм с толщиной стенки до 40 мм и длиной до 18,3 м с наружным антикоррозионным и внутренним гладкостным покрытием в объеме 450 тыс.т труб в год. В 2007 году было выпущено 290 тыс.т. труб для строительства надводной части газопроводов; завод также получил право выпускать трубы для строительства подводных трубопроводов по стандартам норвежской компании DNV.

• В ОАО «Трубная металлургическая компания » разработан проект и начаты строительные работы в действующем трубоэлектросварочном цехе Волжского трубного завода по монтажу оборудования нового трубоэлектросварочного стана по выпуску прямошовных труб диаметром 508-1420 мм с толщиной стенки ло 42 мм, длиной до 12,5 м, мощностью 750 тыс. т труб в год. Пуск стана в эксплуатацию намечен на вторую половину 2008 года.

• ЗАО «Группа ЧТПЗ»

на Челябинском трубопрокатном заводе. построила новый завод «Соединительных отводов для труб большого диаметра» с участком антикоррозионного покрытия для отводов;

В 2007 году на промышленной площадке Челябинского трубопрокатного завода начало строительство нового трубоэлектросварочного цеха, который будет выпускать прямошовные сварные трубы диаметром 610-1420 м класса прочности до Х100 с толщиной стенки до 48мм и длиной до 18,3м. Мощность цеха – 600 тыс.т труб в год. Пуск цеха в эксплуатацию намечено осуществить в июле 2009 года.[8]

Обеспечение производства труб диаметром до 1420 мм плоским прокатом.

В таблице 2 приведены требования к листовому прокату для изготовления труб большого диаметра, определенных Газпромом с очень высокими требованиями к пластичности и доле вязкой составляющей в изломе образцов *DWTT* [4 ,9]

Таблица 2

Требования к механическим свойствам листовой стали*
(поперечные образцы).

Класс прочности	Диаметр трубы, мм	$\sigma_в$, Н/мм2	$\sigma_т$, Н/мм2	δ_5/δ_2, %	KCV^{-20}, Дж/см^2 при давлении, МПа			DWTT^{-20}, % при давлении, МПа		
					7,4	9,8	11,8	7,4	9,8	11,8
К60	1020	590 - 670	500-580	23/30	59	79	99	70	80	80
	1220				79	99	128	80	95	95
	1420				99	128	154	95	95	95
К65	1020	640 - 740	510 - 610	21/29	″	″	″	″	″	″
	1220				″	″	″	″	″	″
	1420				″	″	″	″	″	″

* $\sigma_т/\sigma_в < 0,9$; $\sigma_в$ на продольных образцах не менее 93% $\sigma_в$ на поперечных

Для создания производства листового металла высокого качества созданы совместные программы металлургических комбинатов и трубных компаний: ТМК – Северсталь, ТМК – ММК, ОМК – Северсталь, ОМК – Уральская Сталь, ЧТПЗ – Уральская Сталь, ЧТПЗ – ММК с участием в указанных программах ведущих институтов: ФГУП ЦНИИчермет, ОАО «ВНИИСТ», ООО «ВНИИГАЗ», ОАО «ВНИИТнефть».

● Для обеспечения заготовкой ОАО «Северсталь» провело поэтапную реконструкцию стана 5000, что позволяет организовать производство длинномерных листовых заготовок

для выпуска одношовных сварных труб диаметром 1420 мм с толщиной стенки до 32 мм.

 ISSN 1991-7848

• В октябре 2006 года ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» приступило к реализации проекта строительства комплекса стана 5000 проектной мощностью 1,5 млн. тонн по выпуску толстолистового проката классов прочности Х100-Х120, применяемого для изготовления труб диаметром 1420 мм, а также для судостроения и мостостроения; пуск комплекса в работу намечен на июль 2009 года [10]

• ОАО «ВМЗ» на Выксунском металлургическом заводе начато строительство комплекса стана 5000, который будет обеспечивать плоским прокатом потребность в заготовке для производства прямошовных сварных труб большого диаметра до 1420 мм.

ЛИТЕРАТУРА

1. Д.А.Пумпянский. Тенденции развития и перспективы трубной отрасли. Труды XIII международной научно-практической конференции ″ Трубы – 2005 ″. Часть I. Челябинск, 2005 с.17 - 21
2. Л.А.Кондратов, В.М. Лаврищев. Развитие производства труб в России в 2006 г.// Сталь 2007. № 3 с.61-68
3. А.М. Седых. Стратегические задачи трубной промышленности России по обеспечению развития магистрального трубопроводного транспорта. Труды Х111 международной научно-практической конференции ″ Трубы - 2005 ″. Часть I. Челябинск, 2005 с.21 – 26.
4. В.М.Лаврищев, Л.А Кондратов, А.П.Коликов. Трубное производство России: состояние и перспективы развития.// Черные металлы / Revue de Metallurgie/ 2007 с. 3 – 5. К.А.Семериков. Совершенствование технологии производства спиральношовных ТБД для реализации национальных трубопроводных проектов. Труды XIV Международной научно-практической конференции ″ Трубы - 2006 ″. Часть I. Челябинск, ОАО ″РосНИТИ″, 2006 с. 7 – 22
5. Е.Х. Шахпазов. Создание материалов и технологий для производства труб с новыми свойствами для перспективных газопроводов.. Труды XIV международной научно-практической конференции ″ Трубы - 2006 ″. Часть I. Челябинск, ОАО ″ РосНИТИ″,2006 с.64 – 71
6. П.П.Степанов. Освоение производства электросварных труб большого диаметра на ТЭСА 1420 ОАО «Выксунский металлургический завод». Труды ХШ Международной научно-практической конференции ″ Трубы - 2005 ″. Часть I. Челябинск, ОАО ″РосНИТИ″, 2005 с.75 – 80.
7. В.В.Садыков. Освоение новых видов трубной продукции для проекта «ВСТО». Труды XIV Международной научно-практической конференции ″ Трубы - 2006 ″. Часть I. Челябинск, ОАО ″РосНИТИ″, 2006 с.23 - 31
8. Ю.Ф.Шевакин, А.П.Коликов, Ю.Н.Райков. Производство труб. - М.: Интермет Инжиниринг, 2005. – 568 с
9. В.Ф.Рашников. Научные разработки как основа программы инновационного развития ОАО ММК.// Сталь 2007. № 2 с.10 - 12

УДК. 621.774.35.016.3

Король Р.Н.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЗНАКОПЕРЕМЕННОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛА СВАРНОЙ ТРУБНОЙ ЗАГОТОВКИ

Впервые приведены результаты экспериментального исследования влияния знакопеременной деформации на структуру и механические свойства металла сварной заготовки, применяемой для изготовления прецизионных тонкостенных и особотонкостенных труб.

Вперше приведені результати експериментального дослідження впливу знакозмінної деформації на структуру та механічні властивості металу зварної заготівки, що використовується для виготовлення прецизійних тонкостінних і особливотонкостінних труб.

The results of the experimental investigation of the sign-alternating deformation influence on the structure and mechanical properties of metal of the welded pipe workpiece used for manufacture of precision thin-walled and especially thin-walled tubes have been presented for the first time.

Введение

Одним из перспективных направлений снижения цикличности производства и повышения точности тонкостенных и особотонкостенных труб, является использование сварной заготовки, изготовленной из холоднокатаной ленты, имеющей высокую точность по толщине [1, 2].

Проблема. В процессе холодной периодической прокатки сварной заготовки может происходить разрушение сварного шва, на трубах после прокатки имеют место продольные риски и трещины в переходной зоне основной металл – сварной шов, что не допускается. Как установлено в работе [1], появление трещин и рисок связано с наличием внутреннего грата заготовки и происходит вследствие неодинаковой деформации шва, околошовной зоны и основного металла, являющейся результатом неоднородности структуры и свойств по периметру трубы, или концентрации напряжений при прокатке на границе «шов – металл» из-за различной толщины стенки трубы в этой области. Все это приводит к тому, что сварная заготовка почти не используется для промышленного производства прецизионных труб.

Анализ исследований. Исследование изменения структуры и механических свойств основного металла, околошовной зоны и сварного

© КОРОЛЬ Р.Н., 2008

 ISSN 1991-7848

шва заготовки при различных режимах термической обработки и в процессе деформации на станах холодной прокатки проведено в работе [1]. Предложенная в данной работе технология получения тонкостенных и особотонкостенных труб из сварной заготовки на станах ХПТР, исключая процесс редуцирования, не получила промышленного применения.

В работе [2] была предложена рациональная энергосберегающая технология изготовления тонкостенных и особотонкостенных труб повышенной точности из сварной заготовки. Однако в вышеуказанных работах не проведены исследования влияния знакопеременной деформации на структуру и свойства шва и околошовной зоны сварной заготовки.

Влияние знакопеременного кручения на механические свойства при волочении стальной проволоки исследовано в работе [3]. Подтверждено, что вышеуказанное нагружение создает в упрочненном металле тенденции к разупрочнению.

Комплексное исследование влияния изгиба и кручения на механические свойства стальной проволоки проведено в работе [4].

Не исследованными являются вопросы изменения механических свойств и структуры металла шва и околошовной зоны сварной заготовки в процессе ее подготовки к прокатке на станах ХПТР по разработанной технологии [2].

Целью данной работы является экспериментальное исследование влияния знакопеременной деформации с посадкой по диаметру на свойства и структуру сварного шва, околошовной зоны и основного металла заготовки.

Результаты исследований. Для проведения исследований была отобрана опытная партия сварной заготовки в количестве 47 м размером 42Ч2Ч2350 мм из нержавеющей коррозионностойкой марки стали аустенитного класса 08Х18Н10Т, изготовленная по ГОСТ 11068-81 «Трубы из коррозионностойкой стали электросварные», на стане аргоно – дуговой сварки АДС 20-76. Наружный грат на заготовке был снят.

Заготовка была подвергнута термической обработке для снятия остаточных напряжений. Вышеуказанная обработка проводилась на установке индукционного нагрева (активная рабочая длина – 580 мм; тиристорный преобразователь частоты ТПЧ 250/2,4) по режиму: температура нагрева – 1150°С, скорость прохождения трубы – 0,84 м/мин, охлаждение на воздухе.

Установлено, что на отобранных после отжига образцах макроструктура заготовки по периметру неоднородна. На макрошлифе

сварного соединения шов имеет столбчатую, транскристаллитную структуру с повышенной травимостью в зоне сплавления. Структура основного металла и сварного шва плотная, трещин, рыхлости, пор, расслоений металла не обнаружено.

Исследования микроструктуры металла заготовки выполнялись на микроскопе отраженного света «Неофот - 21» при различных увеличениях. Оценка загрязненности металла труб неметаллическими включениями показала, что содержание карбонитридов не превышает 1,5 балла по методу Ш6 ГОСТ 1778–70.

Анализ микроструктуры сварного соединения показал, что шов исходной трубы состоит из нескольких участков: центральная часть шва состоит из неориентированных дендритов, в пограничной зоне дендриты расположены перпендикулярно линии сплавления.

Ярко выраженной зоны термического влияния в данной сварной заготовке не выявлено [5]. В околошовной зоне происходит процесс преобразования столбчатых кристаллов в равноосные зерна аустенита, одновременно образовались частицы ферритной фазы округлой формы.

Структура основного металла состоит из аустенита, карбидов и ферритной фазы (α-фазы). Ферритная фаза в исходном металле расположена в виде вытянутых вдоль направления прокатки волокон.

Опытная партия труб была подвергнута знакопеременной деформации на косовалковой правильной машине типа «И - 5626» в последовательно расположенных 3 парах валков. Было произведено несколько циклов деформации с постепенной посадкой заготовки по диаметру начиная с 0,2 мм, причем после каждого цикла осуществлялся разворот ее на 180°. Суммарная деформация по диаметру составила в среднем 4,4%. Знакопеременную деформацию осуществляли до появления концевых трещин в околошовной зоне.

При многократной правке с посадкой по диаметру на косовалковых правильных машинах заготовка подвергается сложной знакопеременной деформации продольного, поперечного изгибов и кручения.

В процессе знакопеременной деформации в наружных и внутренних слоях заготовки образовалась метастабильная фаза – мартенсит деформации Md (рис. 1) – это привело к поверхностному упрочнению. Мартенсит деформации расположен по линиям скольжения и представляет собой феррито - карбидную смесь. Эффект упрочнения внутренней поверхности с помощью дробеструйной обработки с последующей термической обработкой используется при производстве труб из нержавеющих марок сталей аустенитного класса для исключения

 ISSN 1991-7848

образования продольных трещин, рисок и «седины» на внутренней поверхности труб при редуцировании [8]. Таким образом, вышеуказанный эффект способствует предотвращению механизма трещинообразования в переходной зоне сварной шов – основной металл.

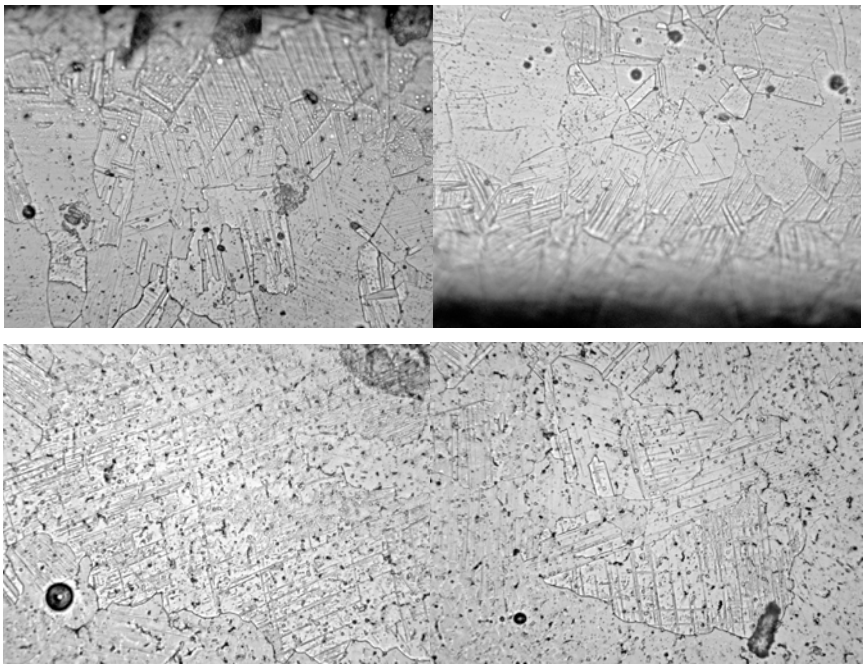


Рисунок 1 – Общий вид Md фазы в поверхностных слоях металла заготовки после деформационной обработки. (×500): а – наружная поверхность основного металла; б – внутренняя поверхность основного металла; в – наружная поверхность сварного шва; г – внутренняя поверхность сварного шва

Последующий гомогенизирующий отжиг провели в проходной роликовой печи типа СРО по режиму: время выдержки – 30 мин., температура нагрева – 1080°С, охлаждение на воздухе.

Знакопеременная деформация с последующим гомогенизирующим отжигом сварной заготовки создает тенденции к выравниванию структуры по периметру трубы. В переходной зоне и сварном шве образовались зерна такой же величины, что и в основном металле - это создает благоприятные условия для последующей повышенной деформации по диаметру и толщине стенки в процессе прокатки на станах ХПТР.

Испытания на растяжения в продольном направлении проводили с учетом работы [9] по ГОСТ 1006-80 на продольных полосах:

- основной металл – полосы шириной 8 мм, длиной 180 мм;
- сварной шов и околошовная зона - полосы шириной 4 мм, длиной 160 мм.

Вышеуказанные испытания проводили на испытательной машине FPZ - 100/1 со скоростью перемещения подвижного захвата 2 мм/мин.

в зоне упругой деформации и 4 мм/мин. – после достижения предела текучести. Результаты испытаний на каждом этапе обработки, средние по 20 образцам, представлены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты исследований механических свойств сварной заготовки

Состояние труб	Место вырезки образцов	Направление вырезки образцов	Временное сопротивление разрыву, $\sigma_в$, МПа	Предел текучести, $\sigma_т$, МПа	Относительное удлинение, δ,%	Твердость по Виккерсу, HV_5
1	2	3	4	5	6	7
Заготовка после термической обработки	Основной металл	Продольные	582	232	61,5	185
	Околошовная зона		578	276	50,1	175
	Сварной шов		597	325	40,5	195
	Основной металл	Поперечные	697	504		
	Околошовная зона		718	500		
	Сварной шов		618	478		
Заготовка после термической обработки и деформации	Основной металл	Продольные	722	592	36,2	292
	Околошовная зона		671	562	35,0	260
	Сварной шов		700	580	21,0	285
	Основной металл	Поперечные	945	905		
	Околошовная зона		753	747		
	Сварной шов		794	787		
Заготовка после деформ. и гомогенизирующего отжига	Основной металл	Продольные	595	200	61,0	148
	Околошовная зона		615	230	58,3	
	Сварной шов		620	235	55,0	

Испытания в поперечном направлении проводили на кольцевых образцах шириной 10 мм по методике представленной в работе [10]:

 ISSN 1991-7848

основной металл, сварной шов и околошовная зона с проточкой радиусом и глубиной 2 мм. Вышеуказанные испытания проводили на испытательной машине УД - 10/90 с варьированием скорости перемещения подвижного захвата, аналогичным вышеописанным. Усредненные результаты испытаний на каждом этапе обработки представлены в таблице 1.

Измерения твердости по Виккерсу производили на торцах кольцевых образцов шириной 10 мм по ГОСТ 2999-75 при нагрузке 5 кгс на твердомере ТП-15. Усредненные значения твердости на каждом этапе обработки представлены в таблице 1.

Анализ результатов исследований, представленных в таблице 1, показывает:

1. В состоянии после термической обработки, применяемой для снятия остаточных напряжений, прочностные свойства в продольном направлении по периметру трубы имеют близкие значения, в отличие от поперечного направления, где имеется анизотропия свойств до 15%. Анизотропия пластических свойств по периметру трубы в продольном направлении достигает 50% в отличие от поперечного направления. Околошовная зона обладает пониженными прочностными свойствами в продольном направлении и меньшей твердостью.

2. В отличие от результатов исследований, полученных в работе [1], при посадке по диаметру в процессе знакопеременной деформации наибольшему наклепу подвергается основной металл, а наименьшему – околошовная зона.

3. После знакопеременной деформации 4,4% и гомогенизирующего отжига произошло выравнивание механических свойств по периметру трубы – прочностных и пластических, анизотропия свойств в продольном направлении отсутствует. Отличия твердости по периметру трубы не выявлены.

При изготовлении сварных труб из нержавеющей стали типа 18-10-Ti обращают особое внимание на обеспечение высокой коррозионной стойкости сварного шва, особенно стойкости против межкристаллитной коррозии. Испытания на склонность к межкристаллитной коррозии сварной заготовки до и после знакопеременной деформации производили по методу АМ ГОСТ 6032-89, склонность к межкристаллитной коррозии в обоих случаях не выявлена.

Выводы

1. Знакопеременная деформация приводит к упрочнению внутренней и наружной поверхностей сварной заготовки. Эффект наклепа

внутренней поверхности в значительной мере обуславливает отсутствие разрушения металла в переходной зоне сварной шов – основной металл.

2. Совместное действие знакопеременной деформации с последующим гомогенизирующим отжигом приводит к выравниванию механических свойств по периметру трубы и создает тенденции к выравниванию структуры, что создает благоприятные условия для последующей повышенной деформации по диаметру и толщине стенки в процессе прокатки на станах ХПТР.

Перспектива. На основании результатов проведенных исследований может быть разработана высокоэффективная технология изготовления прецизионных труб из сварной заготовки на станах ХПТ и ХПТР.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гуляев Г.И., Войцеленок С.Л. Качество электросварных труб./М.: Металлургия, 1978. – 256 с.
2. Король Р.Н., Очеретная Н.Н., Кузьменко В.И. Усовершенствование технологии изготовления тонкостенных и особотонкостенных труб повышенной точности из сварной заготовки // Металл и литье Украины, 2007. – №3. – С. 21-25.
3. Должанский А.М., Очеретная Н.Н. Деформация кручением проволоки и ее влияние на процесс волочения // Металлургическая и горнорудная промышленность, 2007. – №6 (245). – С. 56-59.
4. Зильберг Ю.В., Соболевський С.И., Вазенмиллер А.А. Влияние изгиба и кручения на свойства проволоки из стали 1кп // Металлургическая и горнорудная промышленность, 2007. – №6 (245). – С. 56-59.
5. Медовар Б.И. Сварка хромоникелевых аустенитных сталей/ М.: Машгиз, 1958. – 340 с.
6. Сокуренко В.П., Малыш А.Д., Левченко Л.М., Абросимова Т.Н. Точность определения предела текучести при испытаниях на растяжение плоских и трубчатых образцов // Производство труб и баллонов. – Днепропетровск: ДТИ, 2002. – С. 118-122.
7. Малыш А.Д., Вахрушева В.С., Левченко Е.Б. Определение механических свойств швов сварных труб при испытании кольцевых образцов // Производство труб и баллонов. – Днепропетровск: ДТИ, 2002. – С. 122-127.
8. Рентгенографическое исследование влияния технологической обработки на состояние поверхностного слоя холоднокатаных труб из стали Х18Н10Т / П.М. Юшкевич, З.А. Кофф, Н.И. Фомичева, ЮМ. Беликов и др. // Трубное производство. – Днепропетровск: ВНИТИ, 1971. – Вып. 1. – С. 112-120.

 ISSN 1991-7848

УДК 621.7

Д.Е.Кузнецов

МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ТРУБ

Приведені зведення про методики оцінки стану внутрішньої поверхні труб за допомогою вимірювань, виконаних в послідовності профлилей поперечних перетинів за допомогою контактного датчика. Встановлені амплутудно-частотные характеристики відхилень макро- мікровідхилень. Для оцінки нерівномірності поверхні застосований показник ентропії зображень, отриманих за допомогою світлового і растрового мікроскопів.

Приведены сведения о методиках оценки состояния внутренней поверхности труб с помощью измерений, выполненных в последовательности профлилей поперечных сечений с помощью контактного датчика. Установлены амплутудно-частотные характеристики отклонений макро- микроотклонений. Для оценки неравномерности поверхности применен показатель энтропии изображений, полученных с помощью светового и растрового микроскопов.

The informaton on techniques of the estimation of the condition of the internal surface of tubes. The measurements were executed in sequence of profiles of cross-section sections by means of the contact sensor. Amplutudno-frequency characteristics of deviations makro - microdeviations are established. The indicator of entropy of the images received by means of light and raster microscopes is applied to the estimation of non-uniformity of surfaces.

Введение

Состояние внутренней поверхности бесшовных труб, используемых в атомной и тепловой энергетике, в прецизионном машиностроении, в ряде других отраслей промышленности, в значительной мере определяет эксплуатационную надежность различного рода установок, работающих при повышенных давлениях, температурах, воздействии агрессивных сред.

В статье приводятся сведения, касающиеся методик, применявшихся в ГП «НИТИ» при проведении исследований закономерностей формирования внутренней поверхности холоднокатаных труб из сплава циркония, сквозная технология изготовления которых изложена в [1] и отработана с участием к.т.н. Буряк Т.Н. и Благовой В.А.

Проблеме повышения качества внутренней поверхности, анализу причин образования дефектов типа «седина», складок, трещин посвящены работы [2 - 15]. Неопределенность терминов, определяющих состояние поверхности, а также недостатки метрологического обеспечения ставят под сомнение достоверность полученных результатов. В

© Д.Е.КУЗНЕЦОВ, Е.Д.КУЗНЕЦОВ, 2008

основном они базировались либо на оценках показателя R_a, находившегося с помощью профилографирования поверхности в продольном направлении, либо на результатах измерения глубины отдельных складок с помощью микроскопа. В некоторых работах вообще не проводились измерения, а выводы делались лишь на основе предположений.

При использовании щуповых методов исходными параметрами являются: направление трассы измерения, её длина, шаг дискретизации и характеристики фильтров. К каким ошибочным результатам может привести игнорирование этих параметров можно видеть на рисунке 1, где приведен снимок внутренней поверхности холоднокатаной трубы и показаны возможные направления измерений. Уже на основании этого рисунка можно утверждать о неприемлемости оценки состояния внутренней поверхности при традиционном продольном измерении.

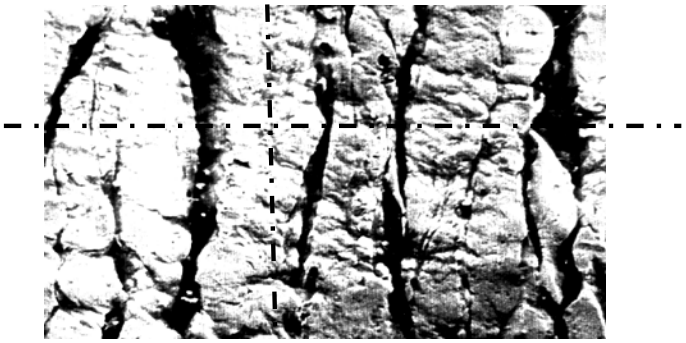


Рисунок 1 - Состояние внутренней поверхности холоднокатаной трубы 25×1, 5 мм, сталь 0Х18Н10Т, увеличение ×1000.

Современные профилографы позволяют помимо общеизвестных характеристик R_a и R_z на основании одного измерения позволяют получать комплекс показателей, включая амплитудные, пространственные и гибридные характеристики. В последнее время получают развитие пространственные характеристики состояния поверхностей. Но в большинстве случаев они стандартизированы применительно к поверхностям, подвергнутым механической обработке, отличающихся относительно регулярными отклонениями. Механизм формирования внутренней поверхности катаных труб принципиально иной и требует иного подхода при проведении измерений

Для исследования структуры профилей поперечных сечений внутренней поверхности использовали измерительно-вычислительный комплекс, обладающий следующими характеристиками:

- измеритель - кругломер "Талиронд-3";
- контактный датчик - игла с радиусом закругления 1мкм.

 ISSN 1991-7848

компьютер - процессор Intel Celeron, 851 МГц, 256 МБ ОЗУ.

система - Microsoft Windows XP Professional, версия 2002;

- минимальная дискретность измерения в поперечном сечении $\Delta = \pi$ * диаметр сечения / 3500.

- минимальная дискретность измерений в продольном направлении 0,05 мм;

- погрешность измерения по амплитуде ± 0,5 мкм;

- объем измерительной информации для одного поперечного сечения 3500 значений, для трехмерного анализа до 500 000 значений.

Алгоритм обработки измерительной информации следующих процедурах:

- масштабирование;

- удаление аномальных значений;

- центрирование, удаление трендов;

- оценка автокорреляционных функций, определение наличия периодических компонент;

- проектирование цифровых фильтров;

- фильтрация измерительной информации;

- нахождение оценок функций спектральной плотности;

- вейвлет-анализ временных рядов;

- оценка статистических характеристик;

- графическое представление результатов вычислений.

Применение разработанной методики позволило определить структуру профилей поперечных сечений внутренней поверхности холоднокатаных труб широкого сортамента. На рисунке 2 приведена круглограмма поперечного сечения трубы размером 35Ч5 мм из сплава Zr1Nb, прокатанной на стане ХПТ55. Принципиальное особенность состоит в том, что профили поперечных сечений в общем случае нестационарные, содержат периодические и случайные составляющие.

Измерения, проведенные в последовательности поперечных сечений, показали, что такая нестационарность приводит к формированию продольно ориентированных углублений, которые могут служить концентраторами локальных деформаций при нагружении внутренним давлением. Применяемые в настоящее время традиционные методы контроля труб не в состоянии выявить такого рода размерные аномалии.

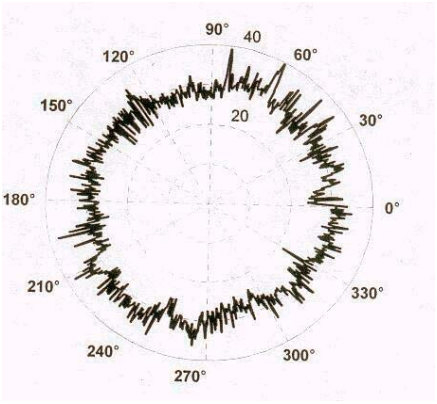


Рисунок 2 - Круглограмма поперечного сечения внутренней поверхности трубы размером 35×5 мм, сплав Zr1Nb.

О частотных характеристиках периодических составляющих можно судить на основе нормированной автокорреляционной функции, показанной на рисунке 3, и амплитудном спектре, приведенном на рисунке 4.

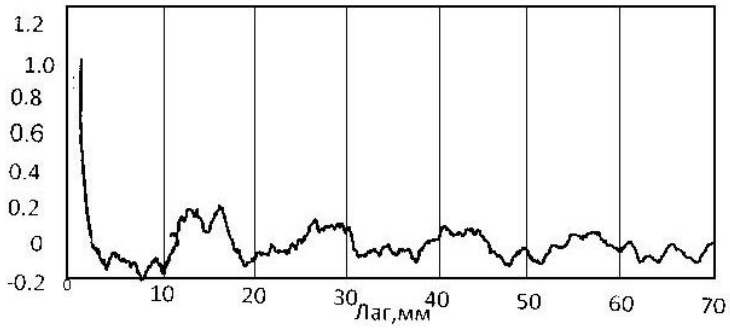


Рисунок 3 - Автокорреляционная функция профиля поперечного сечения внутренней поверхности трубы размером 9,1×0,7 мм из сплава Zr1Nb.



Рисунок 4 - Амплитудный спектр профиля поперечного сечения внутренней поверхности трубы размером 9,1×0,7 мм из сплава Zr1Nb.

 ISSN 1991-7848

На основе полученных результатов предложена следующая классификация составляющих отклонений профилей поперечных сечений катаных труб:

макроотклонения – низкочастотные компоненты с длиной периода в пределах 0,18 –0,4 длины периметра и микроотклонения – высокочастотные составляющие, длина периода которых находится в интервале 0,001–0,5 мм.

Для оценки структуры микроотклонений, ширина которых меньше радиуса закругления иглы контактного датчика, использовали оптический метод. Он основан на анализе снимков поверхности, полученных с помощью оптических и растровых электронных микроскопов. Эта методика применялась для выявления взаимосвязи между микроструктурой сплава и микрорельефом поверхности, снимки которых приведены на рисунках 5а и 5б.

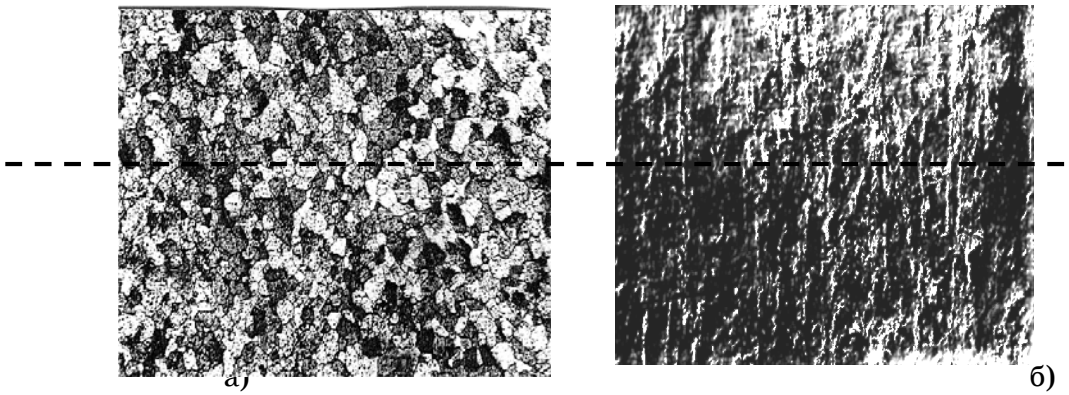
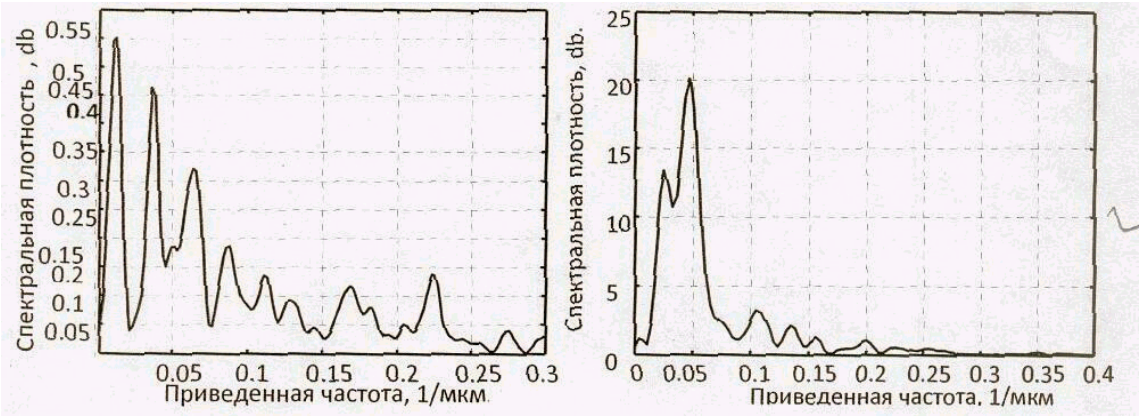


Рисунок 5а - Микроструктура труб размером 9,1×0,7 мм из сплава Zr1Nb при увеличении ×400, рисунок 5б снимок внутренней поверхности трубы размером 9,1×0,7 мм из сплава Zr1Nb при увеличении ×200.

Там же показано положение секущих, относительно которых определялись отклонения яркости, выраженное в пикселях. Последующая обработка полученных данных включала определение оценок нормированных автокорреляционных функций и амплитудных спектров. Последние показаны на рисунках 6а и 6б.

На основании полученных результатов установлена близость частот отклонений микроструктуры микрорельефа. Для выяснения причин размытости спектра микроструктуры в области низких частот проведена процедура выделения границ зерен с использованием оператора Прюита (Prewitt). Результаты приведены на рисунке 7.



а) б)

Рисунок 6а - Амплитудный спектр отклонений вдоль секущей микроструктуры, рисунок 6б - амплитудный спектр отклонений вдоль секущей микрорельефа.

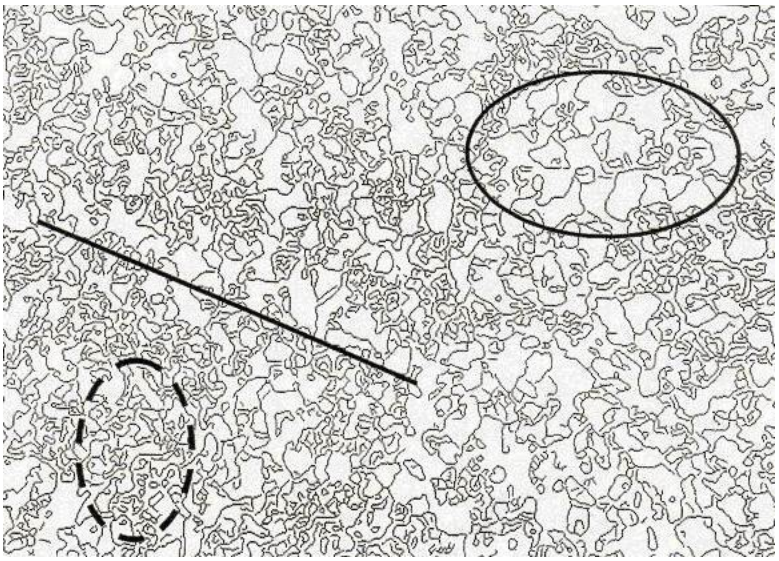


Рисунок 7 - Положение границ зерен, сплошная линия – зоны крупных зерен, пунктирная линия – зоны мелких зерен.

При изготовлении труб из сплавов циркония и титана для удаления дефектов внутренней поверхности применяют струйное травление смесью азотной и плавиковой кислот. Для оценки эффективности такой технологии использовали методику, основанную на определении величины энтропии изображения поверхности. Этот показатель является статистической характеристикой случайности, которую используют в информационных технологиях для характеристики текстуры изображения[16]. Для определения энтропии использовали выражение:

 ISSN 1991-7848

$$E = -\sum_{0}^{255} P(i) * \log_2 P(i)$$

где P - значения гистограммы отклонений изображения. Результаты оценки энтропии внутренней поверхности труб из сплава циркония в состоянии после прокатки и струйного травления приведены в таблице 1.

Таблица 1

Энтропия внутренней поверхности труб размером 17×1,9 мм, сплав Zr1Nb.

Характеристики.	Состояние поверхности.					
	После прокатки.			После струйного травления.		
Дискретность измерения, мкм	0,65	0,26	0,13	0,65	0,26	0,13
Размеры изображения, мкм.	345*546	150*220	75*110	337*550	146*220	72*110
Энтропия.	55,9	48,4	47,6	45,5	43,6	45,42

Полученные результаты дают основание делать вывод, что за счет струйного травления достигнуто некоторое улучшение внутренней поверхности, но, тем не менее, имеет место существенная неоднородность, которая может оказывать отрицательное влияние на эксплуатационные свойства труб.

ЛИТЕРАТУРА

1. Патент на винахід. UA 81167 Україна, МПК B21C23/02. Спосіб виготовленя цирконієвих труб// Сокуренко В.П., Вахрушева В.С., Сухомлин Г.Д. та ін. (ДП «НДТІ» им. Я.Ю.Осади); заявка № a200600077, заявл. 03.01.2006, опубл. 10.12.2007, бюл. №20, 2007р.-3с.
2. Калибровка инструмента станов ХПТ, обеспечивающая лучшее использование пластичности прокатываемого металла и улучшение качества внутренней поверхности труб / О.А.Семенов и др. // Производство труб. Сб. трудов ВНИТИ. М., 1965, № 15.
3. К вопросу о распределении деформаций в обжимной зоне стана периодической прокатки труб / Кочегаров П.А.// Производство труб. Сб. трудов ВНИТИ. М., 1969, № 21, с. 48-53.
4. Калибровка инструмента станов ХПТ, обеспечивающая лучшее использование пластичности прокатываемого металла и улучшение качества внутренней поверхности труб / Семенов О.А., Левайнем В.Г., Беликов Ю.М., Дуплий Г.Д. // Производство труб. Сб. трудов ВНИТИ. М., 1965, № 15, с. 31-32.

5. Особенности дефектов типа «седина» на поверхности холоднокатаных труб / З.А.Кофф, Ю.М.Беликов, М.В.Попов и др. // Производство труб. Сб. трудов ВНИТИ. М., 1970, № 24,
6. / Новая технология производства особо толстостенных труб / Семенов О.А., М.В.Попов, О.А.Пляцковский, Р.Л.Заславский и др. - Металлургическая и горнорудная промышленность: Днепропетровск: 1970, № 5.
7. Зависимость качества холоднодеформированных толстостенных труб от состояния поверхностного слоя заготовки / Семенов О.А., М.В.Попов, Р.Л.Заславский и др. - Металлургическая и горнорудная промышленность: Днепропетровск, 1971, № 2.
8. Влияние деформации по диаметру и стенки на механические свойства. / М.В.Попов, О.А.Пляцковский, Р.Л.Заславский. - Металлургическая и горнорудная промышленность: Днепропетровск: 1974, № 3.
9. О допустимой степени редуцирования при проктке особо толстостенных труб. / Семенов О.А., М.В.Попов, Р.Л.Заславский и др. - Металлургическая и горнорудная промышленность: Днепропетровск, 1974, № 5.
10. Способы предупреждения косых трещин на холоднокатаных трубах. /В.Р.Кучеренко, С.Н.Кекух, И.М.Обух-Швец и др. – Сталь, 1975, № 7, с.632 – 633.
11. Влияние редуцирования на качество внутренней поверхности труб при холодной прокатке./ В.Р.Кучеренко, Г.И.Хаустов, И.Ю.Коробочкин, С.Н.Кекух. – Металлургическая и горнорудная промышленность: Днепропетровск: Промінь, 1979, №2, с.19-13.
12. Кекух С.Н., Кучеренко В.Р., Дуплий Г.Д. Исследование причин появления складок и трещин на внутренней поверхности труб при прокатке на станах ХПТ. – в кн.: Теоретические проблемы прокатного производства: Тезисы докл. и сообщ. III Всесоюзн. науч.- техн.конф. Днепропетровск, ДметИ, 1980, с. 250.
13. Беликов Ю.М. Кинематические и технологические вопросы интенсификации процесса прокатки труб на станах ХПТ. Диссертационная работа на соискание ученой степени кандидата технических наук. Днепропетровск. 1967 г.
14. Заславский Р.Л. Исследование и совершенствование процесса производства холоднокатаных толстостенных труб. Диссертационная работа на соискание ученой степени кандидата технических наук. Днепропетровск. 1974 г.
15. Кекух С.Н. Разработка и внедрение рациональных режимов деформации и параметров калибровки для производства труб из нержавеющих сталей и сплавов с улучшенным качеством поверхности на станах холодной прокатки. Диссертационная работа на соискание ученой степени кандидата технических наук. Днепропетровск. 1986 г.

 ISSN 1991-7848

УДК 621.919: 621.98.011

Кухарь В.В., Грушко А.В., Еленич Н.П.

ПРЕДЕЛЬНАЯ СТЕПЕНЬ ОСАДКИ С ПРОДОЛЬНЫМ ИЗГИБОМ ТРУБНЫХ ЗАГОТОВОК ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ОБВОДНЫХ ПАТРУБКОВ

Работа посвящена определению максимальной степени осадки с продольным изгибом трубных заготовок в технологии производства обводных патрубков, при которой в заготовках возникают критические напряжения, приводящие к искажению и овализации поперечного сечения.

Роботу присвячено визначенню максимального ступеня осаджування з поздовжнім вигином трубних заготовок у технології виробництва обвідних патрубків, при якій у заготовках виникають критичні напруги, що приводять до викривленню й овалізації поперечного перерізу.

Work is devoted a determination of maximal degree of upsetting with the longitudinal bend of pipes billets in technology of production the by-pass union couplings during which in billets there are critical stresses arise up and resulting to distortion and make oval of cross-section.

Введение

Обводные патрубки широко используются в энергетическом машиностроении, теплоэнергетическом оборудовании, промышленной арматуре, различных циркуляционных контурах, авиационной промышленности и т.д. Известны случаи их использования в устройствах для получения жидкого или газообразного топлива [1], в пищевой (винодельческой) промышленности [2], причем данными отраслями область их применения не ограничивается.

Традиционные способы гибки труб сопровождаются уменьшением площади поперечного сечения по биссектрисе угла изгиба [3], что приводит к увеличению местных сопротивлений трубопроводов.

Решения в данном направлении предложены, например, на основании использования специализированных фильер[4]. Известны способы гибки труб с применением наполнителей в виде песка или свинца [3, 5].

Указанные способы малопроизводительны и не обеспечивают полноты извлечения из трубного изделия наполнителей, летучие соединения и пары которых могут быть токсичны.

Для изготовления, например, крутоизогнутых колен используют заполнение трубной заготовки эластичной средой (резиной, полиуретаном и т.п.). При таком способе необходимо обеспечить повышенное давление наполнителя путём гофрирования заготовки с последующим раз-

© КУХАРЬ В.В., ГРУШКО А.В., ЕЛЕНИЧ Н.П., 2008

глаживанием гофра [6] или выполнения концевой части проходного канала в виде последовательно расположенных сопряженных усечённых конусов [7]. Так же применяют эластичные втулки или оправки, которые обеспечивают растяжение трубных заготовок в окружном направлении, что препятствует искажению поперечного сечения [8].

Данные способы и устройства рассчитаны на деформирование стальных тонкостенных заготовок. Аналогичны технологические ограничения способов [9-11], где стеснённая трубная заготовка проталкивается через формующий канал и калибрующий дорн. Для реализации таких технологий стеснённого изгиба используется специализированное оборудование или инструмент с достаточно сложной конструкцией.

Следует отметить положительное влияние продольной сжимающей силы, в результате действия которой происходит раздача заготовки в окружном направлении, уменьшая искажение поперечного сечения по биссектрисе угла изгиба. Напряженно-деформированное состояние, соответствующее изгибу со сжатием, наблюдается и при продольном изгибе за счет потери устойчивости при осадке высоких цилиндрических заготовок [12, 13]. Возможно деформирование как в горячем, так и в холодном состоянии.

На основе данных предпосылок был предложен способ получения крутоизогнутых трубных элементов методами продольного изгиба трубных заготовок [14, 15]. Однако, не смотря на достаточную изученность авторами напряженно-деформированного состояния заготовок, геометрических отклонений размеров и остаточной пластичности металла в работах [17, 18], предельные значения такого технологического фактора, как степень осадки, ограничиваемая браковочными признаками, не выяснена.

Целью настоящей работы является установление величин предельных степеней осадки с продольным изгибом трубных заготовок в зависимости от особенностей их формоизменения под влиянием таких факторов, как относительные геометрические размеры и материал заготовки.

Осадку с продольным изгибом цилиндрической трубной заготовки проводят в гладких параллельных плитах. Степень осадки трубы определяют из выражения:

$$\varepsilon_y = \frac{L_0 - H_к}{L_0} \cdot 100\%, \qquad (1)$$

где L_0 – длина (высота) трубной заготовки; $H_к$ – конечная высота заготовки после осадки.

Формоизменение условно можно разделить на две стадии: первоначальная, когда труба осаживается без изгиба, и основная, реали-

 ISSN 1991-7848

зуемая за счет потери устойчивости заготовки, находящейся в пластическом состоянии. Вторая стадия сопровождается характерным изгибом оси с продолжающимся её укорочением (рис. 1).

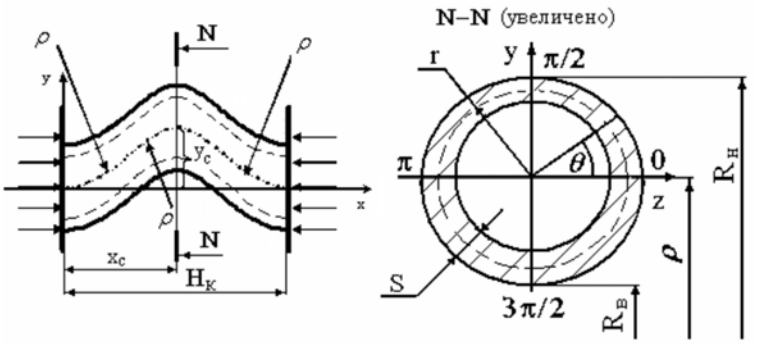


Рисунок 1 – Схема осадки трубной заготовки: ρ и S – соответственно радиусы кривизны и толщина стенки трубы после деформации; Нк – конечная высота осаженной трубной заготовки; хс = Нк/2 – для симметричного прогиба; ус – прогиб заготовки по средней линии; r – окружной радиус срединной поверхности трубы; Rв и Rн – внутренний и наружный радиусы кривизны изогнутой трубной заготовки соответственно; θ – угол, определяющий положение материальной точки в сечении трубы

Укорочение оси представляет собой величину:

$$\delta = \frac{L_0 - L_к}{L_0} \cdot 100\% , \qquad (2)$$

где L_0 и $L_к$ – начальная высота трубной заготовки и длинна её изогнутой оси после осадки соответственно.

Окончанием второй стадии следует считать появление овализации поперечного сечения при больших степенях осадки, смятия стенок трубы или гофрообразования, т.е. проявление потери устойчивости второго рода, (браковочные признаки).

Предварительно проведенные эксперименты по холодной осадке стальных (Сталь 3), медных (М1), латунных (Л98) и свинцовых (ССу) образцов показали, что в первом приближении должны выполняться следующие условия, связанные с осуществимостью процесса L_0/D_0 = 3,3 ÷ 6,2 и $S_0/D_0 \geq 0{,}17$, где D_0 и S_0 – начальные диаметр и толщина заготовки соответственно. Это связано с тем, что при $S_0/D_0 < 0{,}17$ первая стадия осадки заготовки слишком мала и потеря устойчивости второго рода наступает сразу в начале основной стадии при малых степенях осадки. Заготовки с $L_0/D_0 < 3{,}3$ после осадки не получают требуемой изогнутой формы, а заготовки с $L_0/D_0 > 6{,}2$ при изгибе не увеличивают поперечное сечение по биссектрисе прогиба (сечение NN по рис.1). Именно увеличение проходного сечения в месте изгиба тру-

бы позволяет получать патрубки с пониженным гидравлическим сопротивлением [14, 15, 17].

При анализе процесса принимали следующие допущения:

- кривая течения материала заготовки при холодной деформации аппроксимируется степенной зависимостью вида $\sigma_i = Ae_i^n$, где σ_i – интенсивность напряжений; e_i – интенсивность логарифмических деформаций; n – показатель упрочнения материала;

- полагаем, что материал изотропный;

- процесс монотонный (наиболее грубое допущение для зон, которые в первой стадии осаживаются, а во второй подвержены растягивающим осевым напряжениям);

- считаем оболочку (изгибающуюся заготовку) безмоментной, соответственно, в пластической области реализуется плоское напряженное состояние с главными нормальными напряжениями в поперечном (σ_α) и меридиональном (σ_θ) сечениях трубы, касательное напряжение $\tau_{\alpha\theta} = 0$;

- по всей длине заготовки справедлива гипотеза плоских сечений;

- гофрообразование, овализация, смятие и прочие геометрические отклонения возникают при превышении напряжениями σ_α и σ_θ некоторой критической величины.

В результате рассмотрения напряженно-деформированного состояния трубной заготовки, осаживаемой с продольным изгибом, ранее, в работах [16, 17], были получены уравнения для расчета главных нормальных напряжений в поперечном (σ_α) и меридиональном (σ_θ) сечениях трубы:

$$\sigma_\alpha = A \;\; e_\alpha{}^n 2^n \left(2 + \frac{r}{r + \rho/\sin\theta}\right)^{-n} \left[1 + \frac{r}{r + \rho/\sin\theta} + \left(\frac{r}{r + \rho/\sin\theta}\right)^2\right]^{0{,}5n - 0{,}5}; \qquad (3)$$

$$\sigma_\theta = -\sigma_\alpha \frac{r}{\rho + r\sin\theta}, \qquad (4)$$

где $e_\alpha = \ln\dfrac{1 + (r\sin\theta)/\rho}{1 + \delta/(1+1)}$ - продольные логарифмические деформации в поперечном сечении.

Единого критерия для выявления условий появления браковочных признаков по потере устойчивости второго рода не выявлено. При различных процессах листовой штамповки ориентируются на технологические задачи, при этом предельные соотношения первоначальных размеров заготовок определены эмпирическим путём [19]. В нашем случае удобно воспользоваться критерием устойчивого протекания процесса деформации без образования гофр, который приведен в работе [20]:

$$\sigma_\alpha \le 0{,}8\sigma_m ; \qquad \sigma_\theta \le 0{,}8\sigma_m , \tag{5}$$

где σ_m - предел текучести материала заготовки.

Условие (5) было введено в расчетный модуль, составленный в пакете MathCAD по результатам работ [16, 17]. Расчеты проводили для данных эксперимента по холодной осадке латунных (Л98, σ_m = 585 МПа) заготовок D_0 = 14 мм, L_0 = 56; 70 и 84 мм (L_0/D_0 = 4,0; 5,0 и 6,0 соответственно), при толщинах стенки S_0 = 2,5 и 4,0 мм (S_0/D_0 = 0,18 и 0,29 соответственно).

Для вычисления укорочения оси в программе в первом приближении использовалась формула, инвариантная к материалу и относительной толщине стенки трубной заготовки:

$$\delta = k_\delta \left(1{,}716 - 0{,}263 \cdot \frac{L_0}{D_0} \right) \cdot \varepsilon_y , \tag{6}$$

где k_δ = 1÷2, причем значения, близкие к 1 принимались для более толстостенных заготовок из пластичных материалов при больших степенях осадки, а значения, близкие к 2 принимались для тонкостенных заготовок из менее пластичных материалов при не больших степенях осадки.

На рис. 2 приведены рассчитанные значения предельных степеней осадки ($\varepsilon_{y.кр}$) по условию появления потери устойчивости второго рода, а так же описание кривых аппроксимирующими уравнениями для заготовок с различными относительными толщинами стенок: $\varepsilon_{y.кр(018)}$ и $\varepsilon_{y.кр(029)}$ - для заготовок с S_0/D_0 = 0,18 и 0,29 соответственно. Достоверность аппроксимации оценивали коэффициентом детерминации R^2, который при использовании полиномов второго порядка принимает удовлетворительные значения, близкие к единице.

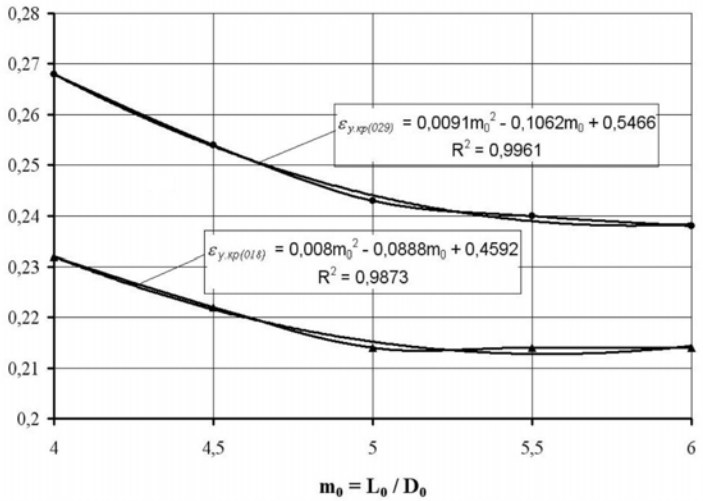


Рисунок 2 - Критические степени деформации при продольном изгибе трубных латунных (Л98) заготовок

В результате обработки полученных данных, при предположении линейной зависимости параметров формоизменения от величин относительной толщины стенки, получили выражения для вычисления предельных степеней осадки с продольным изгибом трубных заготовок:

$$\varepsilon_{y.кр} = A \cdot m_0^2 + B \cdot m_0 + C\,, \qquad (7)$$

где $A = 0{,}01 \cdot \frac{S_0}{D_0} + 0{,}0062$; $B = -0{,}1582 \cdot \frac{S_0}{D_0} - 0{,}0603$; $C = 0{,}7945 \cdot \frac{S_0}{D_0} + 0{,}3163$.

Данная методика может быть использована для расчета предельных степеней осадки трубных заготовок с продольным изгибом из различных материалов.

Выводы

Разработан принцип ограничения предельных степеней осадки с продольным изгибом трубных заготовок, учитывающий критерий возникновения в поперечном сечении критических напряжений, при которых реализуется потеря устойчивости второго рода (искажение, овализация проходного сечения, гофрообразование и т.п.). Первоочередное влияние на величину $\varepsilon_{y.кр}$ оказывают геометрические размеры и свойства материала заготовок.

Перспективой исследований в данном направлении является уточнение величин укорочения оси δ (на которые так же влияют материал и относительные геометрические размеры заготовок) с привлечением методов планирования эксперимента и систем анализа данных, что существенно повысит точность математических моделей для расчета напряженно-деформированного состояния трубных заготовок при продольном изгибе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Патент РФ № 2203922 (RU) МПК7 B01F 7/00, C 10 G 7/06. Способ и установка для переработки влагосодержащего органического вещества в жидкое и газообразное топливо.
2. Патент РФ № 2236445 (RU) МПК 7C 12 G 1/02. Устройство для экстрагирования мезги и отделения сусла.
3. Малов А.Н. Технология холодной штамповки. – М.: Машиностроение, 1978. – 374 с.
4. Ершов А.Г. Формообразование патрубков из труб изгибом, вталкиванием в фильеру с внутренним давлением // Кузнечно-штамповочное производство. – 1974. - №7. – С. 23-26.
5. А.с. 1296262 СССР, МКИ4 B 21 D 9/15. Способ гибки труб.
6. А.с. 1310068 СССР, МКИ4 B 21 D 9/15. Способ изготовления крутоизогнутых колен.
7. А.с. 1255241 СССР, МКИ4 B 21 D 9/15. Устройство для гибки труб.

8. А.с. 1433546 СССР, МКИ4 В 21 D 9/01. Устройство для гибки трубных заготовок.
9. Розенберг О.А., Мельниченко В.В., Студенец С.Ф. Новая технология получения крутоизогнутых стальных отводов методом холодного пластического деформирования // Известия АИН Украины: Спец. выпуск отделения «Тяжелое и транспортное машиностроение». – 1998. – С. 96-102.
10. Формообразование крутоизогнутых отводов изгибом протягиваемой трубы // Розенберг О.А., Огородников В.А., Грушко А.В. и др. Монография. – Винница: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2004. – 140 с.
11. Огородников В.А., Грушко А.В. Моделирование процесса формообразования крутоизогнутых отводов на основе теории деформируемости // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: Зб.наук.праць. – Краматорськ, 2000. – С. 5 - 10.
12. Диамантопуло К.К., Кухарь В.В. Исследование осадки с потерей устойчивости заготовки для приближения её формы к форме поковки // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском у машинобудуванні та металургії: Зб.наук.праць. – Краматорськ, ДДМА, 1999. – С. 71 - 74.
13. Пат. 34699 А Україна, МПК7 В 21К 1/08, В 21К 1/12. Спосіб виготовлення вісесиметричних поковок з відростками.
14. Кухарь В.В., Грушко А.В. Получение обводных патрубков с минимальным гидравлическим сопротивлением. Вестник Приазовского государственного технического университета. Вып. 15. – Мариуполь. – 2005. – С. 109 -112.
15. Декл. пат. 11205 Україна, МПК7 В 21 D 9/15. Спосіб одержання крутозігнутих трубних елементів.
16. Грушко А.В., Кухарь В.В. Деформируемость обводных патрубков в процессе их формоизменения продольным изгибом // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском у машинобудуванні та металургії: Зб.наук.пр. Краматорськ. – ДДМА. – 2006. – С. 335-339.
17. Еленич Н.П., Грушко А.В., Кухарь В.В. Напряженно-деформированное состояние трубчатых заготовок в условиях их пластического продольного изгиба // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: Зб.наук.пр. Краматорськ. – ДДМА. – 2007. – С. 163-168.

УДК 621.774.6

Леткин А.М., Сокуренко В.П., Палкин Ю.А.,
Жданов И.П., Завгородний В.Г.

ПРЕДЕЛЬНЫЕ УСИЛИЯ ОВАЛИЗАЦИИ, ДЕЙСТВУЮЩИЕ НА ПОПЕРЕЧНЫЕ СЕЧЕНИЯ ТРУБ В ПРОЦЕССЕ ПРАВКИ

Рассмотрены основные силовые и настроечные параметры овализации поперечных сечений труб в процессе правки на косовалковых машинах.

Розглянуті основні силові та настроювальні параметри овалізації поперечних перерізів труб у процесі правки на косовалкових машинах.

Basic force and adjustment parameters of ovalization of the tube cross section during straightening in skew-roll straightening machines have been investigated.

Введение

В основе расчетов трубоправильных косовалковых машин используется положение, исходя из которого максимальная сила, изгибающая продольную ось трубы, действующая в очаге деформации, ограничена предельным значением, превышение которого приводит к недопустимой овализации поперечного сечения труб.

Овализация возникает под действием радиальных сжимающих напряжений. Правка тонкостенных труб (D/S=20×40, D - наружный диаметр трубы, S - толщина стенки), в значительной мере определяет качество готовых труб (прямизну продольной оси, геометрию поперечного сечения, чистоту поверхности, механические свойства) является сложной технологической операцией, требующей применения комплексной технологии и специализированного оборудования [1].

Согласно экспериментально полученным данным для тонкостенных стальных труб величина относительной овализации поперечного сечения при изгибе δ равна:

$$\delta = \frac{6 \cdot \left(0{,}2 - \frac{S}{D}\right)}{\left(\frac{\rho}{D}\right)^2}, \qquad (1)$$

где ρ - радиус изгиба продольной оси труб, мм.

При правке изгибом радиус изогнутой продольной оси трубы ρ и наружный диаметр трубы D связаны выражением $\rho \geq 10D$.

Помимо овализации, возникающей при воздействии на трубу изгибающих усилий, различают овальную деформацию поперечного се-

© ЛЕТКИН А.М., СОКУРЕНКО В.П., ПАЛКИН Ю.А., ЖДАНОВ И.П., ЗАВГОРОДНИЙ В.Г. , 2008

 ISSN 1991-7848

чения трубы, создаваемую парой (и более) валков, расстояние между рабочими поверхностями которых меньше наружного диаметра трубы на определенную величину.

Для решения ряда инженерных задач, в частности для такого вида овализации в качестве расчетной применяют схему деформации кругового кольца (статически неопределимого криволинейного стержня).

Рассмотрим круговое кольцо со средним радиусом r_0 из упруго-пластического материала. Кольцо подвергается воздействию двух равных по величине и диаметрально противоположных сил P (рис.1), вызывающих его овализацию.

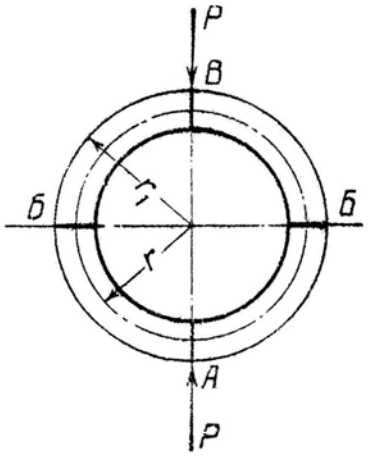


Рисунок 1 – Расчетная схема овализации поперечного сечения труб

Изгибающий момент в произвольном сечении кольца определяется как [2]:

$$M(\theta(= P\cdot r_0\cdot\left(\frac{1}{\pi}-\frac{1}{2}\sin\theta\right) \text{ или } M(\theta(= \frac{Pr_0}{2}(1-\cos\theta)-M_Б. \qquad (2)$$

Поперечная сила в любом сечении равна:

$$Q(\theta(= 0{,}5P\cdot\sin\theta. \qquad (3)$$

Осевая сила, соответственно:

$$N(\theta(= 0{,}5P\cdot\cos\theta. \qquad (4)$$

В первой упругой стадии работы в характерных сечениях кольца возникнут следующие изгибающие моменты M, поперечные силы Q и нормальные силы N:

при $\theta = 0$

при $\theta = \pi/2$ $\left.\begin{array}{l} M_А = M_В = 0{,}318P\cdot r_0; Q_А = Q_В = 0{,}5P; N_А = N_В = 0 \\ M_Б = -0{,}182P\cdot r_0; Q_А = Q_В = 0; N_Б = -0{,}5P \end{array}\right\}$. (5)

Значение максимального упругого усилия овализации кольца $P_{упрmax}$:

- единичной толщины b=1:

$$P_{упрmax} = \frac{S^2}{6} \cdot \sigma_S \cdot \frac{1}{0{,}318 \cdot r_0},$$

где σ_S – предел текучести материала, кг/мм^2;

- толщиной, равной b:

$$P_{упрmax} = \frac{S^2}{6} \cdot \sigma_S \cdot \frac{b}{0{,}318 \cdot r_0}. \qquad (6)$$

Величина укорочения вертикального диаметра кольца (величина овализации) определяется как:

$$\Delta = \frac{6 P_{упрmax} \cdot r_0^{\,3}}{E \cdot b \cdot S^3}\left(\frac{\pi}{2} - \frac{4}{\pi}\right) \approx 1{,}80 \frac{P_{упрmax}}{b \cdot E}\left(\frac{r_0}{S}\right)^3, \qquad (7)$$

где E – модуль упругости материала I рода, кг/мм^2.

Предельная упругая овализирующая сила, воздействующая на поперечное сечения трубы, длиной $L_{ТР}$, равной $L_{РАБ}$ (здесь и далее рассматривается калибр, образованный парой валков) составляет:

$$P_{УПР} = 1.045 \cdot \frac{\sigma_S \cdot S^2 \cdot L_{РАБ}}{(D - S) \cdot \cos\alpha}, \qquad (8)$$

где $L_{РАБ}$ - длина рабочей части валка, мм; α - угол наклона правильных валков, град.

При нарастании сил P шарниры текучести появятся сначала в сечениях A и B. С этого момента начинается вторая стадия деформации кольца – упруго-пластическая. Силы P должны достигнуть величины:

- для кольца единичной толщины b=1:

$$P_S = \pi \frac{S^2}{4 \cdot r_0} \cdot \sigma_S;$$

- толщиной, равной b (мм):

$$P_S = \pi \frac{S^2 \cdot b}{4 \cdot r_0} \cdot \sigma_S = \pi \frac{M_A}{r_0}, \qquad (9)$$

где M_A - пластический изгибающий момент в сечениях A и B.

В дальнейшем силы P могут возрастать только за счет увеличения моментов и нормальных сил в N сечениях Б. Моменты же в сечениях A и B будут, вследствие текучести, сохранять постоянное значение, равное:

 ISSN 1991-7848

$$M_A = M_B = \frac{S^2 \cdot b}{4} \cdot \sigma_S . \qquad (10)$$

Во второй стадии работы кольца изгибающие моменты в сечениях Б выражаются так:

$$M_Б = \frac{Pr_0}{4} + M_A . \qquad (11)$$

Нормальные силы по-прежнему пропорциональны нагрузке и составляют $N_Б = -\frac{P}{2}$.

Для установления зависимости между силой и деформацией вертикального диаметра во второй (упруго-пластической) стадии работы кольца, рассмотрим полукольцо, подверженное совместному действию сил $\frac{P}{2}$ и моментов M_A (рис.2).

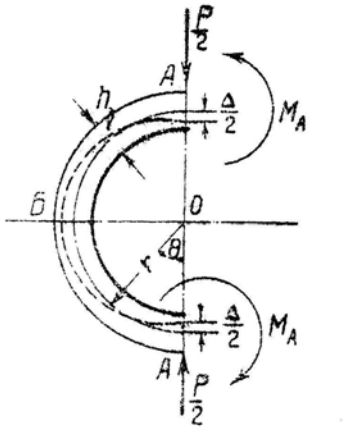


Рисунок 2 – Расчетная схема упруго-пластической стадии работы кольца

Применив обычную формулу для определения перемещений, получим:

$$\Delta = \frac{r_0^{\,2}}{Eb}\int_0^{\frac{\pi}{2}} (PP_0 \cdot \sin^2\varphi - 2M_A \cdot \sin\varphi)\,d\varphi = \frac{12}{Eb} \cdot \left(\frac{r_0}{S}\right)^3 \cdot \left(\frac{\pi}{4}P - \frac{2M_A}{r_0}\right). \qquad (12)$$

Предельная упруго-пластическая сила, воздействующая на поперечное сечения трубы, длиной $L_{ТР}$, равной $L_{РАБ}$ составляет:

$$P_{ПЛАСТ} = 1{,}572 \cdot \frac{\sigma_S \cdot S^2 \cdot L_{РАБ}}{(D-S)\cdot \cos\alpha} . \qquad (13)$$

Конец второй (упруго-пластической) стадии работы кольца определяется возникновением шарниров текучести в сечениях Б. В данный момент силы P достигнут величины:

$$P_{PL} = \frac{2(M_A + M_Б)}{r_0} . \qquad (14)$$

Это значение силы P_{PL} надо рассматривать как разрушающее, поскольку дальнейший рост усилий оказывается невозможным, кольцо переходит в третью пластическую стадию работы, когда рост деформации совершается при неизменном значении нагрузки.

Разрушающая овализирующая сила, воздействующая на поперечное сечения трубы, длиной $L_{ТР}$, равной $L_{РАБ}$ составляет:

$$P_P = 2{,}747 \cdot \frac{\sigma_S \cdot S^2 \cdot L_{РАБ}}{(D-S)\cdot \cos\alpha}. \qquad (15)$$

Усилие овализации поперечного сечения трубы с учетом влияния (жесткости) внешних концов $R_К$, т.е. при $L_{ТР} > L_{РАБ}$, составляет:

$$P_К = \eta \cdot P_i, \qquad (16)$$

где η - коэффициент, учитывающий влияние (жесткость) внешних концов (см. табл. 1).

Таблица 1

Значения коэффициента η

l/D	4.75	4.5	4.0	3.5	3.0	2.5	2.0	1.5
η	1.25	1.25	1.333	1.375	1.4375	1.500	1.75	2.0

Примечание: 1. l - длина очага овальной деформации поперечного сечения трубы парой валков, $l = \frac{L_{РАБ}}{\cos\alpha}$ (мм). 2. Значения коэффициента η приведены для $25 \le D/S \le 30$

При правке овальной деформацией поперечного сечения особотонкостенных труб ($D/S \ge 40$) коэффициент, учитывающий влияние (жесткость) внешних концов η равен:

$$\eta = 1 + \frac{0{,}9 \cdot S}{l}\sqrt{\frac{D}{S}}. \qquad (17)$$

Выводы

Применение овальной деформации поперечного сечения труб в процессе правки на косовалковых машинах влечет за собой корректировку расчетных значений изгибающих усилий.

При расчете настроечных параметров овализации поперечного сечения труб необходимо учитывать ее исходные значения перед правкой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Семененко Ю.Л. Отделка профилей и труб давлением. – М.: Металлургия, 1972. – 232 с.
2. Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В. Справочник по сопротивлению материалов. – Киев: «Наукова думка», 1975. – 704 с.

 ISSN 1991-7848

УДК 621.774.372

Лобанов А.И.

ВОЛОЧЕНИЕ ТРУБ С МАЛОЙ ПОПЕРЕЧНОЙ УСТОЙЧИВОСТЬЮ ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ДЕФОРМАЦИЯХ

З метою підвищення деформації за прохід і скорочення циклічності при волочінні труб з малою поперечною стійкістю і відношенням товщини стінки до діаметру t/D менше 0,02 (особливотонкостінних) в ДП "НДТІ" розроблені і апробовані з позитивним результатом в лабораторних і промислових умовах параметри виготовлення вказаних труб з нержавіючих сталей новими способами:

С целью повышения деформации за проход и сокращения цикличности при волочении труб с малой поперечной устойчивостью и отношением толщины стенки к диаметру t/D менее 0,02 (особотонкостенных) в ГП "НИТИ" разработаны и апробированы с положительным результатом в лабораторных и промышленных условиях параметры изготовления указанных труб из нержавеющих сталей новыми способами:

To increase deformation per pass and reduce cycle number in drawing tubes with a small cross-sectional stability and t/D <0.02 (extremely thin walled tubes), SE "NITI" specialists have developed and tested in laboratory and industrial conditions with positive results parameters of making such tubes of stainless steels using new methods:

Введение

При изготовлении особотонкостенных труб с отношением толщины стенки к диаметру $\left(t/D\right)$ менее 0,02...0,03 максимально допустимая деформация ограничивается, в зависимости от способа деформации, их поперечной и продольной устойчивостью, т.е. способностью указанных труб сохранять при деформации заданную форму без складок, ужимов и гофров.

В виду сложности задачи по обеспечению стабильности процессов деформации и разнообразия сортамента такого вида труб разработан ряд способов из производства [1, 2, 3, 4, 5, 6]:

– безоправочное волочение через две и более волоки;
– холодная прокатка на станах ХПТР;
– волочение на длинной подвижной оправке;
– волочение на короткой неподвижной оправке с приложением к волочильному инструменту ультразвуковых колебаний;
– волочение на эластичной оправке;

© ЛОБАНОВ А.И., 2008.

– волочение на самоустанавливающейся оправке с двумя рабочими конусами;
– волочение с заковкой головок труб с утолщенной, за счет использования сменной втулки-вкладыша, стенкой;
– раскатка труб в обойме (контейнере);
– поперечная обкатка на оправке;
– волочение на деформируемом сердечнике с последующим его удалением посредством выплавления или вытравливания;
– гальванический метод с последующим вытравливанием основы;
– сварка труб, в том числе с использованием фольги, и пр.

В ГП "НИТИ" разработаны и усовершенствованы способы изготовления труб с малой поперечной устойчивостью, предусматривающие снижение материальных и энергетических затрат.

Одним из наиболее распространенных и простых способов деформации особотонкостенных труб является безоправочное волочение через две волоки. Весьма важным фактором, как показали эксперименты, выполненные в ГП "НИТИ", является при этом рациональное распределение деформации в волоках. При указанном распределении коэффициент вытяжки в выходной волоке μ_2 в 1,02...1,07 раза превышает коэффициент вытяжки во входной волоке μ_1, т.е., суммарный коэффициент вытяжки μ_Σ может быть представлен выражением:

$$\mu_\Sigma = (1{,}02...1{,}07)\mu_1^2 \qquad (1)$$

Объясняется возможность увеличения деформации в выходной волоке, по сравнению с входной, уменьшением диаметра трубы (а, соответственно, и увеличением отношения t/D), а также уменьшением влияния геометрических несовершенств головки трубы в результате деформации во входной волоке. На рисунке 1 представлены образцы труб, протянутых при завышенной (рис. 1а) и недостаточной деформации (рис. 1б) в первой волоке, а также при рекомендуемом распределении деформаций (рис. 1в).

С целью определения характера влияния формы канала волок на устойчивость особотонкостенных труб рассмотрена устойчивость оболочек положительной $\left(\frac{1}{R_1}\cdot\frac{1}{R_2}>0\right)$, нулевой $\left(\frac{1}{R_1}\cdot\frac{1}{R_2}=0\right)$ и отрицательной $\left(\frac{1}{R_1}\cdot\frac{1}{R_2}<0\right)$ гауссовой кривизны (рис. 2), соответст-

 ISSN 1991-7848

вующих по форме волокам с вогнутым радиальным, стандартным коническим и выпуклым радиальным профилем (где R_1 – радиус кривизны в продольной плоскости, R_2 – на рис. 2 не показан).

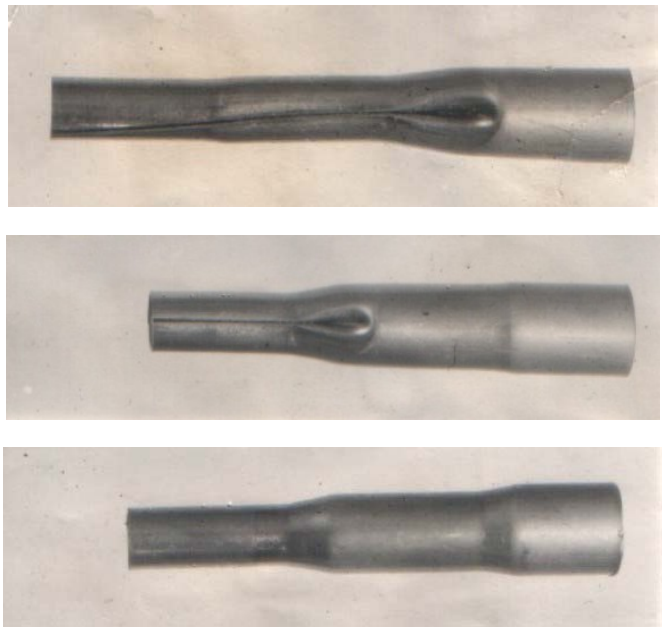


Рисунок 1 – Влияние распределения деформации в волоках на допустимую степень суммарной деформации при волочении труб из стали 08Х18Н10Т по маршруту 10×0,21→5,88×0,21 мм с коэффициентом вытяжки μ_Σ = 1,72 (ε=41%): а) μ_1=1,42; б) μ_1=1,13; в) μ_1=1,27.

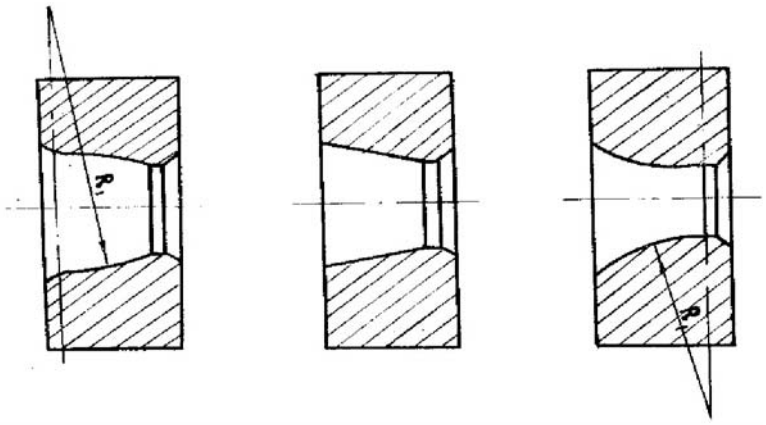


Рисунок 2 – Формы рабочего профиля волок положительной (а), нулевой (б) и отрицательной (в) гауссовой кривизны.

В результате ряда преобразований с использованием исследований [7] упругий прогиб тонкостенных оболочек может быть представлен в виде выражения:

$$W_k(M) = \frac{R_2^2 q_k \overline{\Psi}_k(M)}{Et\left(1+\frac{R_2}{R_1}\right)^2}, \qquad (2)$$

где $W_k(M)$ – упругий прогиб, оболочки, вызываемый поперечной нагрузкой для k–той составляющей гармоники;

t – толщина стенки оболочки;

E – модуль упругости;

q_k – поперечная нагрузка;

$\overline{\Psi}_k(M)$ – член билинейного разложения функции влияния упругого прогиба по ортонормированным собственным в области срединной поверхности оболочки функциям Ψ_k.

Получено также выражение, характеризующее зависимость критической поперечной нагрузки q_{kp} и устойчивость оболочки от формы оболочек:

$$q_{kp} \sim \frac{Et}{R_2}\left(1+\frac{R_2}{R_1}\right) \qquad (3)$$

Анализ представленных выше выражений свидетельствует о том, что оболочки положительной гауссовой кривизны имеют упругий прогиб меньше, а несущую способность больше, чем оболочки нулевой, а тем более отрицательной кривизны.

С целью проверки результатов теоретического анализа было проведено волочение труб из сталей Х18Н9Т размером 20×0,19 мм с отношением толщины стенки к диаметру $t/D \approx 0{,}009$ с использованием специальных волок с радиальным вогнутым (рис. 2а), радиальным выпуклым профилем канала волоки (рис. 2в), а также стандартных волок с углом рабочего профиля 12°. Головки труб заковывали вручную "на восьмерку". Волочение осуществляли на волочильном стане усилием 80 кН при скорости 13 м/мин. Результаты экспериментов, представленные в таблице 1, подтвердили эффективность применения волок с радиальным вогнутым профилем канала (положительной гауссовой кривизны). С целью исключения влияния на устойчивость труб геометрических несовершенств волоки в начальный момент волочения у труб размером 23×0,35 мм (соотношением толщины стенки к диаметру 0,05) из стали Х18Н9Т в процессе 7-8 проходов на ротационно-ковочной машине заковывали головки "на кувшинчик" – без складок и ужимов. При волочении этих труб через волоки с радиаль-

 ISSN 1991-7848

ным вогнутым, коническим и радиальным выпуклым каналом максимально достигнутые деформации составили соответственно 21, 12 и 8 %.

Таблица 1

Результаты опытов по волочению труб с применением волок радиального и конического профиля.

Профиль волоки	Маршрут волочения, мм	Диаметр волоки, мм	Степень деформации, %	Общее количество протянутых труб, шт.	Количество нормально протянутых труб, шт.
Радиальный вогнутый	Волочение через одну волоку				
	20×0,19→19,5×0,19	19,5	2,5	10	10
	20×0,19→19,0×0,19	19,0	5	10	10
	19,5×0,19→18,5×0,19	18,5	5,1	10	10
	19,5×0,19→18,0×0,19	18,0	7,6	10	0
	Волочение через две волоки				
	20×0,19→18,5×0,19	19,5	7,5	14	14
		18,5			
	Волочение через три волоки				
	20×0,19→18,0×0,19	19,5	10	5	5
		18,5			
		18,0			
Конический	Волочение через одну волоку				
	20×0,19→19,85×0,19	19,85	0,7	10	5
	20×0,19→19,63×0,19	19,63	1,8	10	0
	20×0,19→19,5×0,19	19,5	2,5	5	0
	Волочение через две волоки				
	20×0,19→19,63×0,19	19,85	1,8	10	5
		19,63			
	20×0,19→19,5×0,19	19,85	2,5	10	0
		19,5			
Радиальный выпуклый	20×0,19→19,5×0,19	19,5	2,5	5	0
	20×0,19→19,0×0,19	19,0	2,6	5	0

Полученные данные подтверждают целесообразность использования, с целью сокращения цикличности производства при волочении труб с малой поперечной устойчивостью, волок с вогнутым радиальным профилем канала. Рациональным, как и в случае использования волок со стандартным коническим профилем, является волочение через 2-3 волоки.

При безоправочном волочении труб с отношением t/D менее 0,02 эффективность процесса существенно снижается, тем более, что в данном случае заковка головок труб "на кувшинчик" (без складок и ужимов) становится многоцикличной или невозможной. В связи с указанным ГП "НИТИ" (ВНИТИ) разработаны способ волочения труб с малой поперечной устойчивостью через две волоки на эластичной (упруго-эластичной) оправке [8] и конструкция эластичной оправки [9], позволяющие значительно повысить степень деформации таких труб за проход. Схемы указанного процесса волочения и конструкция оправки представлены соответственно на рис. 3 и 4.

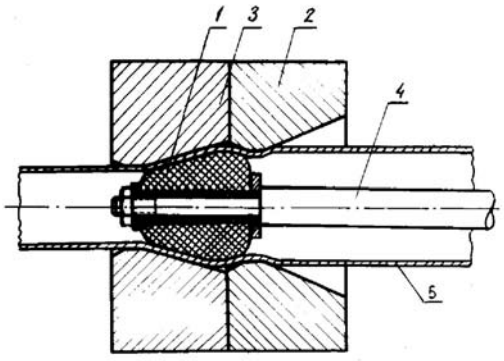


Рисунок 3 – Способ волочения труб с малой поперечной устойчивостью на неподвижной эластичной оправке: 1 – эластичная оправка; 2, 3 – волоки; 4 – стержень; 5 - труба.

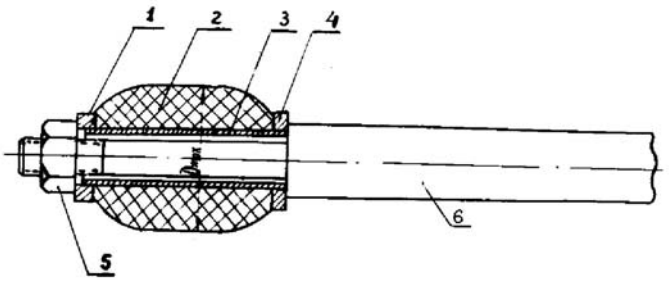


Рисунок 4 – Эластичная (резиновая) оправка: 1,4 – шайбы; 2 – эластичная втулка; 3 – металлическая втулка; 5 – гайка; 6 – стержень.

При исследовании описанного способа волочения в качестве волочильного инструмента использовали оправки из маслостойкой и протекторной резины повышенной твердости (таблица 2).

При использовании оправок с твердостью, менее приведенной в таблице 2, на трубах образовывались дефекты, в частности в виде волнистости, как это видно на рисунке 5. На рисунке 5 также видно, что при выходе из зоны подпора оправкой в волоке на заднем конце трубы в результате потери устойчивости образуются складки.

 ISSN 1991-7848

В таблице 3 представлены некоторые опытные маршруты волочения особо тонкостенных труб из стали Х18Н9Т разработанным способом.

Таблица 2

Физико-механические характеристики резины, используемой для изготовления оправок

Характеристики резины	Вид резины	
	маслостойкая	протекторная
Напряжение при удлинении 300%, МПа	7,4…8,5	12…13
Временное сопротивление при разрыве, σв,МПа	30…34	21…23
Относительное удлинение, δ5, %	600…650	450…480
Твердость, НШ	70…80	65…75
Истираемость, мм3/кВт-ч	2·105	2·105

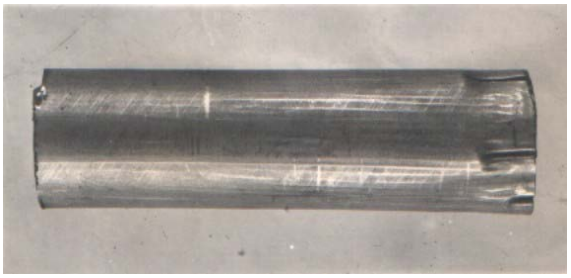


Рисунок 5 – Образование волнистости на трубах из стали Х18Н9Т при волочении по маршруту 20×0,15→17,6×0,15 мм (ε=12%) на эластичной оправке при недостаточной твердости эластичного слоя (50…60 НШ).

Таблица 3

Допустимые деформации при волочении труб с отношением толщины стенки к диаметру $\left(\frac{t}{D}\right)$ в пределах 0,008…0,015

Размер труб, мм		Допустимые деформации, %		$\varepsilon_м / \varepsilon_р$	t/D заготовки
до волочения	после волочения	расчетные $\varepsilon_р$, %, по данным [10]	согласно маршрутам, $\varepsilon_м$, %		
25×0,2	21×0,2	1,79	16	8,93	0,008
20×0,16	16,2×0,16	1,79	18	10,06	0,008
20×0,15	17,6×0,15	1,54	12	7,79	0,0075
18×0,2	15×0,2	3,44	16	4,68	0,011
15,5×0,2	12,8×0,2	3,61	17	4,7	0,012
15×0,2	12×0,2	3,86	20	5,18	0,013
13,5×0,2	10,4×0,2	5,88	22	3,74	0,014
13×0,2	10×0,2	6,6	23	3,48	0,015

При наличии на трубах-заготовках отдельных дефектов в виде пологих вмятин целесообразно осуществлять волочение на удлиненных эластичных оправках, обеспечивающих подпор сечения трубы и устранение вмятин не только между волоками, но и перед входной волокой (рис. 6).

На рисунке 7 представлен образец трубы (зона деформации), протянутой на удлиненной оправке с раздачей трубы перед входной волоокой. Посредством применения указанного технологического приема возможно исправление брака труб по пологим вмятинам.

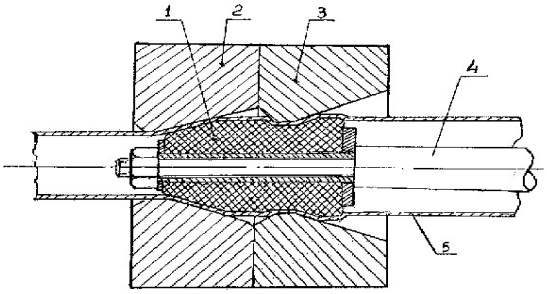


Рисунок 6 – Процесс волочения труб с малой поперечной устойчивостью на удлиненной эластичной оправке: 1 – оправка; 2, 3 – волоки; 4 – стержень; 5 - труба.



Рисунок 7 – Волочение труб из стали Х18Н9Т по маршруту 20×0,2→16×0,2 мм (ε=20,19%) на эластичной удлиненной оправке через две волоки с раздачей трубы перед входной волокой (зона деформации).

С использованием разработанного способа были протянуты и поставлены заказчику трубы из стали Х18Н9Т размерами 10×0,2; 12×0,2 и 18,5×0,2 мм. Волочение осуществлялось при деформациях, в 3-10 раз превышающих традиционно применяемые.

Благодаря использованию разработанного способа были исправлены и поставлены потребителю трубы из тугоплавкого сплава размером 5,5×0,25 мм. Ранее трубы из указанного сплава на размере 13×0,25 мм из-за вмятин считались окончательным браком.

Постоянно актуальным является вопрос изготовления труб с отношением $t/D < 0{,}002$. В ГП "НИТИ" (ВНИТИ) разработан процесс изготовления такого вида труб, включающий холодную прокатку

 ISSN 1991-7848

труб-заготовок на стане ХПТР с наружным диаметром меньше готового размера и последующую продольную многократную обкатку на длинной подвижной оправке с постепенным увеличением диаметра оправки после каждого прохода.

Следует отметить, что способ волочения на длинной подвижной оправке весьма эффективен при волочении особотонкостенных труб в части достижения высоких деформаций по толщине стенки и диаметру, особенно при волочении капиллярных труб.

При длинноправочном волочении труб с $t/D < 0{,}002$ значительно усиливается влияние на ход процесса условий деформации, в частности, условий трения и продольных напряжений, являющихся, в зависимости от их знака, причиной или обрыва труб, или, при потере продольной устойчивости, гофрообразования. При продольной обкатке схема напряженно-деформированного состояния характеризуется всесторонним неравномерным сжатием. Обжатие стенки трубы при этом осуществляется в локальных зонах с поперечным относительно оси трубы истечением металла во внеконтактные зоны.

При этом диаметр труб увеличивается, а их удлинение исключается. Схема деформации пригодна для изготовления уникальных труб с тончайшими стенками, вплоть до микронных.

Реализуется указанный способ следующим образом (рис. 8). На торцовой части трубы 1 (рис. 8б, в) делаются клинообразные вырезы. Оставшиеся после вырезов лепестки загибают внутрь трубы и формируют коническую головку 2. Затем в трубу 1 с минимальным зазором вводят оправку 3 со ступенчатым резьбовым хвостовиком 5. Далее на указанный хвостовик 5 надевают втулку 4, навинчивают гайку-хвостовик 6, прижимая посредством втулки 4 коническую головку 2 трубы к конической части хвостовика оправки. После указанного осуществляется протягивание трубы с оправкой через многороликовую обкатную машину. В результате обжатия стенки трубы при обкатке диаметр трубы увеличивается на величину, зависящую от режима обкатки. При следующем цикле вместо используемой длинной оправки внутрь трубы вводят следующую оправку большего диаметра и повторяют обкатку.

Апробация способа осуществлялась с использованием заготовки размером 21,28×0,055 мм из сплава ЭИ844БУ, изготовленной на стане ХПТР 15-30.

Продольную обкатку производили на обкатной машине конструкции ВНИТИ [17] на оправках из стали ШХ-15 с твердостью по поверхности 58...60 HRC. В результате экспериментов были получены

трубы размерами 22,2×0,048; 23,41×0,046; 27,5×0,037; 38,3×0,02 мм с отношением t/D соответственно 0,021; 0,0019; 0,0013 и 0,0005.

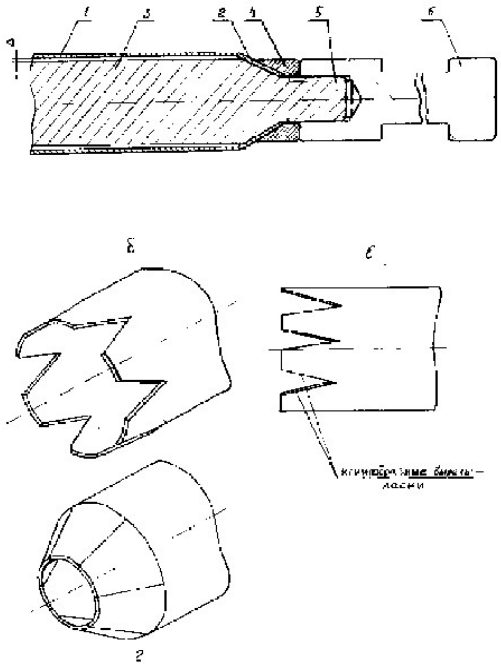


Рисунок 8 – Устройство для продольной обкатки особотонкостенных труб: 1 – труба; 2 – головка трубы; 3 – оправка; 4 – втулка; 5 – хвостовик оправки; 6 – гайка-хвостовик.

Опыты подтвердили, что посредством данного процесса могут быть получены трубы с уникально малым отношением t/D.

Выводы

При безоправочном волочении труб с малой поперечной устойчивостью наиболее эффективной, в части повышения деформации за проход, является форма рабочей поверхности (канала) волок положительной гауссовой кривизны (радиальная вогнутая) – по сравнению с традиционно применяемыми формами канала нулевой гауссовой кривизны (с прямоугольной образующей рабочего канала) и, тем более, отрицательной гауссовой кривизны (радиальной выпуклой).

При волочении труб с отношением толщины стенки к диаметру менее 0,02 целесообразно использование процесса волочения через две волоки на эластичной оправке специальной конструкции с регулируемым диаметром при внутреннем подпоре трубы не только между волоками, но и перед входной волокой. Такой процесс обеспечивает

 ISSN 1991-7848

значительное повышение деформации за проход и возможность исправления брака – дефектов типа пологих вмятин на трубах-заготовках.

При изготовлении труб с отношением t/D менее 0,002 перспективным является многократная продольная обкатка труб на длинной подвижной оправке с постепенным увеличением диаметра оправки после каждого прохода.

ЛИТЕРАТУРА

1. Перлин И.Л., Ерманок М.З. Теория волочения. – М.: Металлургиздат, 1971. – 448 с.
2. Попов М.В., Беликов Ю.М., Близнюков Е.А. Разработка технологии производства труб на станах ХПТР с минимально возможной толщиной стенки // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 1985. – №1. – С. 41-42.
3. Блинов Ю.И. Бондаренко В.П., Шуринов В.А. и др. Изготовление особотонкостенных труб повышенной точности. – Металлург. – 1987. – №10. – С. 18.
4. Савин Г.А. Волочение труб. – М.: Металлургиздат, 1982. – 160 с.
5. Патент США №392084.
6. Шевакин Ю.Ф., Рытиков А.М., Сейдалиев Ф.С. Производство труб из цветных металлов. – М.: Металлургиздат, 1963. – 355 с.
7. Натушкин В.Ф. Прикладная механика, 1968. – Т.4. – Вып. 5. – С. 23-28.
8. Авторское свид. СССР №294404.
9. Авторское свид. СССР №298400.
10. Борисов С.И., Бернштейн М.М. Допустимая величина обжатий при безоправочном волочении труб малых размеров с учетом устойчивости формы трубы в очаге деформации // Бюл. научн.-техн. информации ВНИТИ. – №4. – Металлургиздат, 1958.
11. Авторское свид. СССР №1222348.

УДК 621.7

В.А. Лупин, В.Н. Лозовой, А.И. Губин, А.О. Струин

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ НАТУРНЫХ ИСПЫТАНИЙ ТРУБ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА 1420 ×27.7 ММ ИЗГОТОВЛЕННЫХ ИЗ СТАЛИ КОНТРОЛИРУЕМОЙ ПРОКАТКИ К65.

Fracture kinetics of the main pipeline, connection energy balance with actual speed of propagation fracture in the main crack, plastic zone at the constant speed and constant temperature of test, correlation plastically deformed volume with speed velocity and the form of a notch.

Представлені кінетика розриву магістрального трубопроводу, зв’язок енергетичного балансу з дійсною швидкістю розвитку розриву у головну тріщину, зона пластичності при постійній швидкості та постійній температурі випробування, співвіднесення пластично деформованого об’єму з швидкістю та формою надрізу.

Введение

Экономические выгоды от применения высокопрочных сталей контролируемой прокатки при изготовлении труб очевидны, но столь же не очевидны характеристики трещиностойкости и в связи с этим повышение (или понижение) эксплуатационной надежности магистральных газопроводов (МГ).

Все опытные данные, получаемые при ударных испытаниях (Менаже, Шарпи, DWTT и др.), к сожалению, являются качественными характеристиками процессов разрушения, вполне приемлемы для сравнительной оценки различных материалов, но совершенно бессильны для прогностических оценок труб большого диаметра (ТБД), изготовленных из сталей с временным сопротивлением $\sigma_в$>К65 (Х80), предназначенных на рабочее давление МГ более 10,0 МПа (100 атм).

Для этих случаев учет кинетики разрушения МГ можно выявить только натурными испытаниями труб (отрезков трубопроводов). Цель данной работы связать скорость магистральной трещины V_p с затратами на пластическое деформирование поверхностей разрушения по траектории движения разрушения.

Натурные испытания труб большого диаметра являются наиболее показательными и информативными по сравнению с другими методами определения механических свойств труб, особенно по трещиностойкости. Задача определения трещиностойкости труб с учетом ки-

© В.А. ЛУПИН, В.Н. ЛОЗОВОЙ, А.И. ГУБИН, А.О. СТРУИН, 2008

 ISSN 1991-7848

нетики их разрушения приобретает самостоятельное значение при определении эксплуатационной надежности МГ. Наиболее сложной и важной задачей для эксплуатационной надежности трубопроводов является исключение вязких (хрупких) протяженных разрушений. При движении трещины основными затратами энергии являются пластические деформации берегов магистральных трещин. Поэтому подробно рассматривается пластически деформированный объем металла для фиксированных условий натурных испытаний.

Для суждения о кинетике разрушения труб является утонение (утяжка, уменьшение начальной толщины стенки в характерных зонах при определенной скорости трещины). Изменение утонения (более правильно пластически деформированный объем металла $V_{пл}$) можно проиллюстрировать графиком который представлен на рисунке 1.

Пластически деформированный объем металла $V_{пл}$ при прочих равных условиях зависит не только от температуры, но и от скорости трещины. Объем $V_{пл}$ при натурных испытаниях труб большого диаметра показывает затраты работы разрушения $A_р$ в зависимости от скорости трещины $V_р$ и температуры испытаний t,^{0}C т.е.

$$A_р = f(V_{пл}, V_р, t,°C). \qquad (1)$$



Рисунок 1 - Изменение пластически-деформированного объема по длине разрушенных труб

Объем $V_{пл}$ позволяет определить зону пластического состояния металла (от ε_{1max} до $\varepsilon_{0.2}$; от ε_{3max} до $\varepsilon_{30.2}$; от σ_k до $\sigma_{0.2} = \sigma$), т.е. определить экспериментально границу упругости и пластичности в стенке разрушенной трубы. Работа разрушения A_p, температура испытания, граница упругого и пластического состояния металла необходимы для определения трещиностойкости труб большого диаметра расчетными методами. При малой скорости трещины V^p объем $V^{пл}$ имеет большую величину, при большой скорости трещины – меньшую. При испытании образцов Менаже, Шарпи скорость $V^p \leq 20$ м/с, при испытании образцов ИПГ (DWTT) $V^p \leq 80$ м/с, при натурных испытаниях ТБД $60 \leq V^p \leq 1350$ м/с. Величина скорости трещины V^p позволяет более правильно трактовать понятие хрупкое и вязкое разрушение.

Выводы

При натурных испытаниях труб диаметром 1420×27,7 мм давлением 14,7 МПа (150 атм) установлено следующее: для указанных условий испытания ударная вязкость по Шарпи при -40°С менее 300 Дж/см^2 недостаточна для остановки лавинных вязких разрушений.

 ISSN 1991-7848

УДК 621.774.37

Макиевский Ю. И., Стасовский Ю. Н., Галий С. В.

ПРОИЗВОДСТВО И ПОТРЕБЛЕНИЕ СВАРНЫХ ПРЯМОШОВНЫХ ТРУБ СРЕДНЕГО ДИАМЕТРА: СОСТОЯНИЕ, ПРОБЛЕМЫ, ПЕРСПЕКТИВЫ.

Современный уровень развития нефтегазового комплекса (НГК) обуславливает высокие требования к качеству и надежности потребляемой трубной продукции. Постоянный рост объемов добычи, в том числе за счет освоения новых месторождений и новых регионов промышленной добычи, суровые климатические условия, снижение температуры эксплуатации до минус 40-60^{0}С, требования по экономичности строительства новых трубопроводов, увеличение рабочего давления до 8,4-15 МПа, обеспечение коррозионной стойкости и надежности магистральных трубопроводов постоянно поднимают планку требований к качеству труб.

Сучасний рівень розвитку нафтогазового комплексу (НГК) обумовлює високі вимоги, що висуває споживач по якості та надійності трубної продукції. Постійний ріст обсягів видобутку, в тому числі за рахунок розробки нових місценароджень та нових регіонів промислового видобутку, суворі кліматичні умови, зниження температури експлуатації до мінус 40-60ºС, вимоги економічності будівництва нових трубопроводів, збільшення робочого тиску до 8,4-15 МПа, забезпечення корозійної стійкості та надійності магістральних трубопроводів постійно підіймають планку вимог до якості труб.

Modern level of development of oil and gas industry conditions consumers' high requirements to the quality and reliability of pipes. The constant growth of gas and oil production due to the development of new deposits and regions of commercial production, severe climate conditions, pipeline operational temperature reduction to minus 40-60 °C, requirements to economical effectiveness of new pipeline construction, increased operating pressures up to 8.4 - 15 MPa, securing corrosion resistance and reliability of pipeline mains constantly increase the requirements to the quality of pipes.

Введение. В мировом *нефтегазовом комплексе* (НГК) в XXI веке отмечается оживление работ по разработке крупных проектов строительства магистральных трубопроводов для транспортировки газа, нефти и нефтепродуктов, связанное, в первую очередь, с резким *повышением цен* на нефть и газ. Вместе с тем, отмечается *усиление борьбы за рынки* сбыта трубной продукции. Функционирование предприятий-производителей труб для НГК проходит *в условиях жесткой конкуренции* (сейчас в мире насчитывается 484 предприятий - производителей труб для НГК) на мировых рынках трубной продукции для НГК, в условиях постоянного ограничения экспорта отечественной трубной продукции [1].

В свою очередь, в мировой трубной промышленности (МТП) также наметились устойчивые тенденции, которые определяют стратеги-

ческий вектор её развития и, каким то образом, влияют на отечественную трубную промышленность и нефтегазовый комплекс (НГК).

За последнее десятилетие на международных рынках стальных труб для НГК были поставлены новые более жесткие критерии качества продукции, её эксплуатационной надёжности. Эти критерии нашли своё отражение в стандартах развитых промышленных стран США, Германии, Великобритании, Франции и других. Наблюдается беспрерывный процесс замены бесшовных труб сварными трубами. Причем, с каждым годом доля сварных труб в общем объеме производимых труб в мире увеличивается и уже составляет более 60%.

Сейчас наблюдается переход от ценовой конкуренции на мировых рынках к неценовым методам конкурентной борьбы на основе высокого качества, хорошего обслуживания, предоставления кредита и рассрочки платежей, надежности поставок. Это в значительной мере способствует: повышению уровня оплаты труда и престижности профессии, привлечению свежих трудовых ресурсов на трубные предприятия.

Состояние. По официальным данным [2] объем мирового годового потребления труб составляет 50-60 млн. тонн. Значительную долю (более 60%) занимают сварные трубы широкого сортамента. Различают стальные сварные трубы малого наружного диаметра (до 114 мм), среднего (114-530 мм) и большого диаметра (более 530 мм). В частности, сварные трубы среднего диаметра находят применение практически во всех отраслях хозяйственного комплекса. Особо широкое применение эти трубы получили при строительстве трубопроводов для нефтегазового комплекса (НГК): нефтепроводные - наружный диаметр от 114 до 426 мм, толщина стенки от 4,5 до 20 мм; магистральные трубопроводы - наружный диаметр более 426 мм, толщина стенки более 5 мм; водогазопроводные - наружный диаметр до 165 мм, толщина стенки до 5,5 мм; строительства различных конструкций, агрегатов, машин и др.

В различных странах-производителях труб доля сварных труб в общем объеме производства колеблется: ФРГ (57%), Италия (77%), Франция (53%), Великобритания (95%), Россия (58%), Украина (43%), Канада (100%), США (24%), Китай (57%), Япония (78%), Корея (100%) [3].

В каждой стране разные подходы к структуре производства труб.

 ISSN 1991-7848

В США, например, происходило увеличение доли более дорогостоящих бесшовных труб и снижение доли менее трудоемких сварных труб.

Группа стран (Великобритания, Канада, Корея) выпускают, в основном, сварные трубы, считая более экономичным закупать трудоемкие бесшовные трубы по импорту.

Доля сварных труб в общем объеме их выпуска в России, ФРГ, Франции и Китае находится на одном уровне (53-58%), что свидетельствует о рациональной структуре производства труб.

Украина снизила выпуск сварных труб только по причине отсутствия загрузки производства заказами. Украинские трубные заводы традиционно были ориентированы на выпуск сварных труб для России и мощности их по прежнему остаются высокими (2,5 – 3,0 млн. т в год).

Производство сварных прямошовных труб среднего диаметра в Украине сосредоточено на 3 специализированных предприятиях (3 цеха и 4 трубоэлектросварочных агрегатах – ТЭСА): ОАО «Интерпайп Новомосковский трубный завод» (ОАО «ИНМТЗ») – (ТЭСА 159-529, ТЭСЦ №2); ОАО «Днепропетровский трубный завод» (ОАО «ДТЗ») – (ТЭСА 51-152, №1 и №2, ТЭСЦ); ОАО «Харцызский трубный завод» (ОАО «ХТЗ») – (ТЭСА 19-102) [4].

Предприятия-производители сварных труб в Украине экспортноориентированы. География основных потребителей сварных труб, изготовленных на предприятиях Украины, довольно обширна и представлена следующими странами: Западной Европы (ФРГ, Франция, Испания, Италия, Австрия, Бельгия, Голландия, Нидерланды), СНГ, Африки (Алжир, Габон, Египет, Нигерия, Судан, Тунис, Ливия, Марокко, Ангола), Ближнего Востока, Азии и США. Достаточно успешно закрепляются позиции украинских производителей на рынках таких стран, как: Перу, Эквадор, Конго, Новая Зеландия, Азербайджан, Туркменистан, Иран. На данном этапе наиболее востребованными являются бесшовные трубы общего назначения, на 2-м месте - обсадные трубы, за ними следуют профильные, насосно-компрессорные, сварные общего назначения и водогазопроводные [5].

Благодаря повышению международного имиджа украинских производителей сварных труб с каждым годом более чем на 1/3 возрастают отгрузки труб нефтяного сортамента. К сожалению это достигается не за счет увеличения нашей доли на зарубежном рынке, а за счет роста спроса на данную продукцию, вызванную активной разработкой новых месторождений и необходимостью обновления старых магистралей.

Безусловно, во многом этому способствуют внедрение сертифицированных Систем Управления Качеством API Q1, EN ISO 9001-2001, ДСТУ ISO 9001-2001 по основным международным стандартам API 5L, DIN EN 10208-2, ГОСТ 52079-2003, ГОСТ 20295-85, ГОСТ 10705-80, ТУ 14-3-1424-94. За последние годы более чем в 2 раза выросли объемы производства труб основного сортамента.

Серьезным конкурентом украинским трубам на традиционном российском рынке является Трубная Металлургическая Компания (ТМК) - крупнейший отраслевой холдинг в российской трубной промышленности. Под ее управлением работают ведущие российские трубные заводы - Волжский, Синарский, Северский, Таганрогский металлургический завод. Суммарные производственные мощности ТМК составляют 5 млн. тонн труб в год. Компания является крупнейшим в России производителем трубной продукции, выпуская более 42% российских труб, и входит в тройку крупнейших производителей труб в мире. ТМК также является лидером российской трубной отрасли в экспорте, поставляя за рубеж более половины всего объема отечественного экспорта труб. Продукция компании экспортируется более, чем в 60 стран мира. ТМК выпускает широкий спектр трубной продукции, которая используется в нефтегазовом комплексе, в химической и нефтехимической промышленности, в энергетике и машиностроении, в строительстве, жилищно-коммунальном хозяйстве, судостроении, авиационной, космической и ракетной технике, то есть практически весь диапазон потребностей мирового рынка. Продукция ТМК сертифицирована по международным стандартам API 5L, API 5CT, API 5D, ASTM, DIN и др. На всех заводах компании система качества аттестована в соответствии с требованиями стандартов ISO 9001 и API Spec Q1. В число клиентов ТМК входят ведущие российские и зарубежные компании, среди которых Газпром, Транснефть, Лукойл, Сургутнефтегаз, Exxon, AGIP, Mitsui, Marubeni-Itochu, Wintershall и многие другие. В компании осуществляется масштабная инвестиционная программа, нацеленная на модернизацию производства, обновление действующих производственных фондов и ввод в строй новых мощностей. Ежегодный объем инвестиций превышает $50 млн.

Проблемы. На данном этапе развития трубная подотрасль сталкивается со значительным количеством проблем. Сегодня рыночная экономика ставит на повестку дня вопрос о конкурентоспособности продукции трубных заводов Украины на внутреннем и внешнем (мировом) рынках. Конкурентоспособность любой продукции определяется в первую очередь такими показателями как: качество, цена, ста-

 ISSN 1991-7848

бильность технологии, условий и сроков поставки. В современном аспекте недостаточно рассматривать конкурентоспособность только отдельных видов продукции, а важно добиться конкурентоспособности целых предприятий, подотраслей, отраслей.

При этом, следует отметить, что трубная промышленность Украины, по причине вяло развивающегося внутреннего рынка страны пока еще остается ориентированной на внешние рынки, в первую очередь на российский рынок. Потребность внутреннего рынка в сварных прямошовных трубах среднего диаметра незначительна по сравнению с объемами их производства. Стратегия и тактика работы трубных заводов Украины строится в целом исходя из условий: жесткой конкуренции на мировых рынках трубной продукции; постоянного ограничения экспорта отечественной трубной продукции в Российскую Федерацию, страны Евросоюза, США и многие другие зарубежные страны.

Наряду с этими обстоятельствами, международные потребители стальных труб украинского производства системно повышали требования к качеству металла труб и эксплуатационных характеристик, которые в 90-х годах прошлого столетия практически на всех стадиях сквозной технологической схемы их производства не обеспечивались из-за неустойчивых технологий и нестабильных качественных характеристик.

Среди них наиболее существенные проблемы: *проблемы модернизации оборудования* чаще всего откладываются на потом. В то же время изношенность основных фондов составляет 60% и более. Требуется коренная реконструкция основных фондов, внедрение ресурсосберегающих и экологически безопасных технологий; имеет место высокая *энергоемкость продукции*, в первую очередь, при выплавке жидкого и получении твердого передельного металла. Очевидным направлением развития сталеплавильного производства является переход на электрометаллургический и конверторный способы выплавки и непрерывное литье слябов и заготовок с использованием новейших эффективных технических решений (печь-ковш, непрерывное литье стали, электрометаллургические мини-заводы и прочее). Перспективным является внедрение *сквозных технологий;* отечественные трубы существенно уступают зарубежным аналогам по коррозионностойкости. Сложившаяся в силу ряда причин структура производства и потребления труб в Украине содержит неоправданно высокую долю незащищенных труб при недостаточном производстве и использовании труб с покрытиями (7% от общего объема производства).

Вышеизложенное вызвало необходимость принятия срочных системных мер на государственном и отраслевом уровнях, а также на уровне отдельных предприятий по обеспечению конкурентоспособности трубной продукции и экономической стабилизации подотрасли.

Анализ исследований. За последние годы крупные зарубежные нефтяные и газовые компании разрабатывают собственные технические требования с учетом специфических условий эксплуатации трубопроводов (низкие температуры, агрессивные среды, подводная прокладка и другие).

Современные технические требования к сварным трубам развиваются в следующих основных направлениях:

- повышение требований к рулонному прокату для производства труб: по способу выплавки и разливки стали, химическому составу, структуре и сплошности проката, полю допусков по механическим свойствам и геометрическим параметрам;
- технологические требования к сварочному процессу;
- увеличение объема и видов технологических и сдаточных испытаний;
- ужесточение и автоматизация неразрушающего контроля продукции;
- наличие прозрачной системы прослеживания производства.

На современном этапе все более востребованными становятся высокопрочные трубы классов прочности К60, К65 и К70. Такие трубы закладываются сейчас при проектировании трубопроводов на рабочее давление 9,8 МПа и 11,8 МПа. Еще более высокими стали требования к ударной вязкости основного металла и сварного соединения. Для ответственных трубопроводов требуется поставка труб с регламентированными характеристиками структуры металла (величина зерна, полосчатость, загрязненность неметаллическими включениями).

В последнее время все более жесткими становятся требования к геометрическим параметрам труб: предельным отклонениям по толщине стенки; точности диаметра концов и корпуса труб, овальности, отклонению профиля поверхности трубы от теоретической окружности в районе сварного шва, прямолинейности труб, высоте и ширине валиков усиления сварных швов и др.

Для защиты трубопроводов ТЭК от коррозии и увеличения срока их службы необходимы трубы с наружным трехслойным антикоррозионным полиэтиленовым покрытием и с внутренним покрытием (целесообразно с гладким покрытием).

Мотивация новых технических требований ОАО «Газпром» к трубам для магистральных трубопроводов:

 ISSN 1991-7848

1) увеличение дальности транспортировки газа;

2) повышение производительности газопроводов;

3) снижение удельных затрат на транспортировку газа.

4) мировой опыт транспортировки газа: рабочее давление до 9,8 МПа; диаметр газопроводов до 1420 мм; применение труб категории X42–X80.

Неисследованное. Что касается труб нефтяного сортамента, целесообразно наладить их выпуск в полном соответствии с требованиями, предъявляемыми стандартами API 5CT и API 5L, расширить сортамент труб нефтяного сортамента в хладостойком и коррозионностойком исполнении.

В области производства сварных труб среднего диаметра прежде всего, это расширение сортамента (до диаметра 150 мм), повышение точности труб по диаметру до уровня +0,5%, расширение марочного состава металла труб, повышение их надежности и гарантированной прочности показателей на основе использования различных способов термообработки.

Обоснование экономически целесообразных границ применения технологий дает возможность осуществить выбор эффективной технологии в определенных границах производимого сортамента и обозначить оптимальные объемы производства.

Для оценки эффективности технологий производства электросварных труб необходимо исследовать весь инновационный потенциал отрасли, включая известные технологии, а также новейшие (и еще не внедренные) производственные схемы. Результаты исследований показали, что каждая технология эффективна в определенных границах сортамента труб, которые значительно уже технически возможных границ.

Результаты экономических исследований позволяют достаточно объективно оценить и второй «элемент» конкурентоспособности – себестоимость и цену продукции. В последние годы в ГП «НИТИ» развиваются новые направления, связанные с реализацией инноваций в технологии, начиная от идеи и заканчивая изготовлением оборудования и освоением технологии. При этом нужно отметить, что, заданный уровень качества, может быть, достигнут только на основе значительного повышения качества трубной заготовки.

Постановка задач. Стратегическая долгосрочная программа развития любой индустриальной страны предусматривает постоянную активизацию инновационных процессов во всех сферах жизнедеятельности, совершенствование структуры производства, повышение конкурентоспособности на всех этапах воспроизводства за счет сни-

жения цикличности производства и энергоемкости выпускаемой продукции. Такой программой в Украине является Государственная программа развития и реформирования ГМК на период до 2011 г.

Приоритетными направлениями развития трубной промышленности в рамках указанной программы являются: расширение специализации действующих агрегатов путем освоения производства новых видов труб для ТЭК; обеспечение производства труб согласно международным стандартам; применение методов неразрушающего контроля качества, автоматизированной маркировки, поштучного взвешивания труб, установок пакетирования и консервирующего покрытия труб; производство труб с защитным покрытием из полиэтилена и др.

В области производства *сварных труб среднего диаметра* работы должны вестись в нескольких направлениях. Это расширение сортамента (диаметром менее 150 мм), повышение точности труб по диаметру до уровня +0,5%, расширение марочного состава металла труб, повышение их надежности и гарантированной прочности показателей на основе использования различных способов термообработки. Расширение сортамента *электросварных труб из коррозионностойких сталей* до диаметра более 102 мм; повышение их точности до уровня ±0,5%; обеспечение производства таких труб с толщиной стенки менее 1 мм; с высотой грата не более 0,1 мм (для ТЭНов).

Результаты исследований. На ОАО «ХТЗ» *освоены новые виды* конкурентоспособных труб:

трубы стальные электросварные прямошовные диаметром 508 мм и более толщиной стенки от 7,1 до 23,8 мм из отечественного толстолистового проката категории прочности Grade B-X70 в соответствии с требованиями стандарта API Spec 5L и спецификаций заказчика;

трубы стальные электросварные прямошовные в соответствии с требованиями стандарта API Spec 2B;

трубы стальные электросварные прямошовные с внутренним эпоксидным антикоррозионным покрытием;

трубы стальные электросварные прямошовные из высокопрочной стали категории прочности X80 (K65);

Выводы

Современный производитель, стремящийся к востребованности своей продукции, сталкивается с множеством факторов ограничивающих его долю на мировом трубном рынке. В свою очередь эти же факторы способствуют развитию подотрасли в качественном направлении. Ужесточение требований основных потребителей провоцирует изменение политики производства в сторону ассортимента, качество

 ISSN 1991-7848

которого на порядок выше относительно основного. Такое же влияние несет за собой более развитая инфраструктура стран - основных потребителей трубной продукции. Давая, тем самым, возможность занять целую нишу, выпустив на рынок новый качественный продукт.

Перспектива. Международное энергетическое агентство прогнозирует резкое увеличение потребления нефти и газа, что потребует *строительства новых трубопроводов*.

Анализ показал, что большинство месторождений было освоено в 70-х годах XX столетия, и они уже истощены. Разработка новых месторождений вполне естественно приводит к спросу на трубы среднего диаметра. Наиболее перспективными рынками сбыта для украинских трубников являются Средняя Азия и страны Ближнего Востока.

Литература

1. Стасовский Ю.Н. Качество – превыше всего Трубы для нефтегазового комплекса: мировые тенденции и перспективы Украины / ТЭК, 2007.- №12.- С.30-35.
2. Семенов Д. Н., Забуга М. С. Поставки труб в дальнее зарубежье планируется увеличить на 23,4% //Трубная вертикаль, 2005. - №4. - С. 20-21.
3. Пумпянский Д.А. Тенденции развития и перспективы трубной отрасли // Труды XIII международной научно-практической конференции «Трубы – 2005». Часть I. Челябинск, 2005.- С.17 – 21.
4. Стасовский Ю.Н. Мировая трубная промышленность XXI век / Экономика Украины, 2008.- №5.- С.28-35.
5. Семенов Д. Н., Забуга М. С. Итоги – 2004 // Трубная Вертикаль, 2005. - №1. - С.4-5.
6. Козловский А.И. Институт развития – последние разработки //Трубная вертикаль, 2005. - №3. - С. 16-18.
7. Забуга М. С. В ближайшие год-два наша доля на рынке Казахстана должна составить 30% // Трубная вертикаль, 2005. - №1. - С. 22-23.
8. Семенов Д. Н., Забуга М. С. Сертификация и стандартизация продукции ОАО “НМТЗ” – зеленый свет на рынки // Трубная вертикаль, 2005. - №1. - С.30.

УДК 621.774.38: 621.181.021:669.14

Опрышко Л.В., Ветлянская А.Д., Давыдова Ю.В.

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ ПРОИЗВОДСТВА НА ЖАРОПРОЧНЫЕ СВОЙСТВА КОТЕЛЬНЫХ ТОЛСТОСТЕННЫХ ГОРЯЧЕПРЕССОВАННЫХ ТРУБ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ИЗ НЕДЕФОРМИРОВАННОЙ НЕПРЕРЫВНОЛИТОЙ ЗАГОТОВКИ УГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ

Досліджені характеристики жароміцності металу котельних товстостінних гарячепресованих труб, виготовлених з різними коефіцієнтами витяжки з недеформованої безперервнолитої заготовки різного рівня якості. Показаний взаємозв'язок тривалої міцності та тривалої пластичності з особливостями структурного стану металу цих труб, успадкованого від початкової заготовки і формованого в процесі пресування і термічної обробки труб.

Исследованы характеристики жаропрочности металла котельных толстостенных горячепрессованных труб, изготовленных с различными коэффициентами вытяжки из недеформированной непрерывнолитой заготовки разного уровня качества. Показана взаимосвязь длительной прочности и длительной пластичности с особенностями структурного состояния металла этих труб, наследуемого от исходной заготовки и формируемого в процессе прессования и термической обработки труб.

Heat resistance characteristics of metal of thick-walled hot extruded boiler tubes produced at various elongation coefficients from non-deformed continuously cast billets of various quality degrees were investigated.Interrelation of long-term strength and long-term ductility with the features of the structural state of metal of such tubes inherited from the starting billet and formed in the process of extrusion and heat treatment of the tubes was shown.

Введение

Для производства горячедеформированных труб из углеродистой стали по ТУ 14-3-460 «Трубы стальные бесшовные для паровых котлов и трубопроводов», наряду с катаной или кованой заготовкой, полученной из слитка стационарной или непрерывной разливки с регламентируемым нормативной документацией коэффициентом вытяжки или уковом, используют недеформированную непрерывнолитую заготовку.

Такая технология внедрена на ОАО «Волжский трубный завод» (ОАО «ВТЗ»), для которого ГП «НИТИ», с учетом имеющегося на этом предприятии современного оборудования (прессовых линий и электрометаллургического комплекса с УНРС), разработало принципиально новую энергосберегающую технологию изготовления котель-

© ОПРЫШКО Л.В., ВЕТЛЯНСКАЯ А.Д., ДАВЫДОВА Ю.В., 2008

 ISSN 1991-7848

ных труб способом горячего прессования непосредственно из недеформированной непрерывнолитой заготовки [1, 2].

ОАО «ВТЗ» может изготавливать по новой технологии согласно требований ТУ 14-3-460 промышленные партии котельных горячепрессованных труб из стали 20 диаметром до 219 мм и толщиной стенки до 20 мм.

Для получения разрешения Котлонадзора на применение таких труб в объектах теплоэнергетики на критические и сверхкритические параметры пара и соответственно включения их в требования ТУ 14-3-460 потребовалось проведение исследований жаропрочных свойств толстостенных труб.

Материалом для исследований послужили котельные горячепрессованные трубы размерами 168×22, 168×26, 168×30 и 219×26 мм из стали 20, изготовленные с различными коэффициентами вытяжки (9,5; 8,3; 7,4 и 6,1 соответственно) на прессовой линии усилием 55 МН ОАО «ВТЗ». Для производства этих труб использовали недеформированную непрерывнолитую заготовку по ТУ 14-1-5319 «Заготовка непрерывнолитая для котельных труб» диаметром 350 мм различных плавок: пл. 291401 (трубы 168×22 мм), пл. 29779 (трубы 168×26 и 168×30 мм) и пл. 261644 (трубы 219×26 мм). Химический состав металла заготовок всех 3-х плавок по содержанию углерода и основных легирующих элементов был практически идентичен и удовлетворял требованиям ТУ 14-1-5319. Исследования жаропрочных свойств металла труб диаметром 168 мм с различными толщинами стенок проводили после нормализации, а труб размером 219×26 мм – после горячего прессования и нормализации. Качество металла труб всех исследованных размеров и состояний по кратковременным механическим свойствам при комнатной и повышенной температурах, технологическим свойствам и структуре (полосчатости и ориентации по видманштетту) отвечало всем требованиям ТУ 14-3-460. Испытания на длительную прочность проводили на цилиндрических образцах диаметром рабочей части 10 мм при температуре 450°С и напряжениях 140-250 Н/мм^2. Максимальное время до разрушения образцов от труб всех исследованных размеров и состояний (вариантов) составило 24-27 тыс. часов при напряжении 140 Н/мм^2. Суммарное время до разрушения образцов от трубы одного варианта составило 80-150 тыс. часов.

По данным жаропрочных испытаний построены кривые и методом экстраполяции определены пределы длительной прочности за 100 тыс. часов металла всех исследованных труб (табл. 1).

Таблица 1

Значения предела длительной прочности металла труб

Размер труб, D×S, мм	Состояние металла труб	Предел длительной прочности за 100 тыс. часов, $\sigma^{10^5}_{д.п.}$, Н/мм^2
168×22	после нормализации	100,0
168×26	после нормализации	108,0
168×30	после нормализации	76,0
219×26	после горячего прессования	108,0
	после нормализации	106,0
Норма по ТУ 14-3-460		**78,0**
С учетом допустимого ТУ 14-3-460 20%-ного снижения		**62,0**

Полученные результаты свидетельствуют о соответствии длительной прочности труб всех вариантов требованиям ТУ 14-3-460. Значение предела длительной прочности металла практически всех исследованных труб превышает норму, а для труб размером 168×30 мм находится в интервале допустимого техническими условиями 20%-ного снижения от нормы.

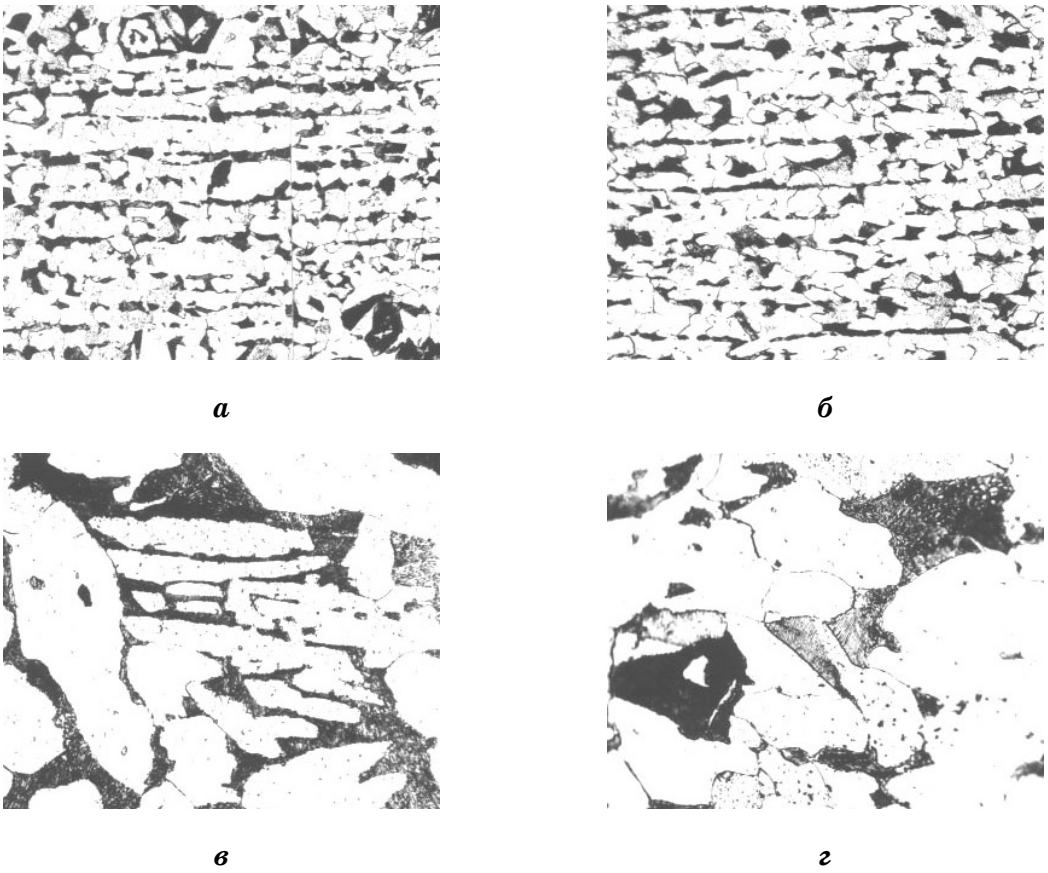
Металл труб размером 219×26 мм, изготовленных с низким коэффициентом вытяжки (μ = 6,1), в различных состояниях (горячепрессованном и нормализованном), наряду с высокой длительной прочностью, отличается высокой длительной пластичностью (относительным удлинением) – 27,9-38,9 %. Нормализация незначительно снизила длительную прочность этих труб, повысив средний уровень длительной пластичности.

Длительная пластичность нормализованных с отдельного нагрева труб диаметром 168 мм более низкая, особенно с толщиной стенки 22 мм и изменяется в широком диапазоне: 8,0-29,1 %.

Металлографические исследования разрушенных образцов с разным уровнем длительной пластичности показали наличие в металле образцов с более низкими значениями этого показателя неоднородной структуры с видманштеттом и неравномерным (аномальным) распределением структурных составляющих (рис. 1-3). Наиболее ярко эта особенность выражена в трубах размером 168×22 мм.

Микроструктура разрушенных образцов от труб размером 219×26 мм как в горячепрессованном, так и нормализованном состояниях характеризуется однородностью и равномерным распределением структурных составляющих (рис. 4).

 ISSN 1991-7848



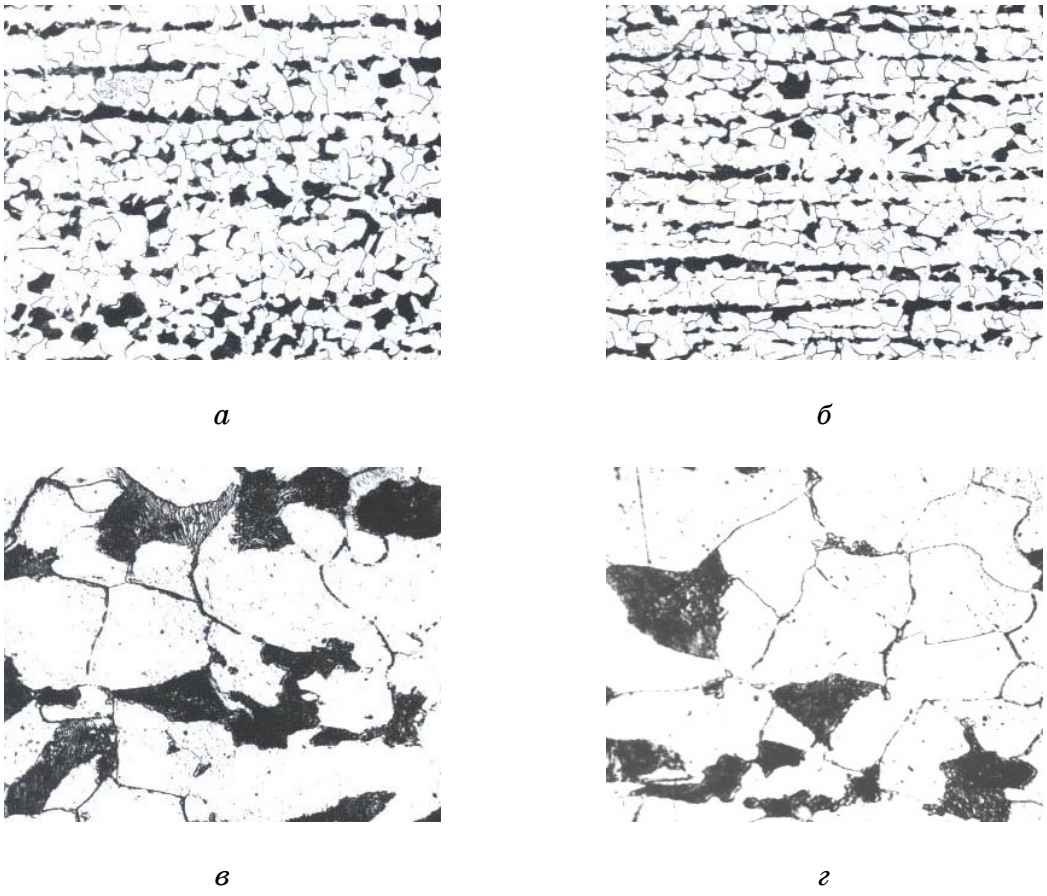
а *б*

в *г*

Рисунок 1 – Микроструктура металла разрушенных образцов от труб размером 168×22 мм с низкой (а, в) и высокой (б, г) длительной пластичностью. Травление в 5 %-ном растворе HNO3: а, в - δ = 11,0 %; б, г - δ = 23,7 %; а, б - × 100; в, г - × 500

Исследованиями ГП «НИТИ», выполненными ранее, выявлена зависимость структуры и свойств, в том числе жаропрочных, металла горячепрессованных труб, полученных из недеформированной непрерывнолитой заготовки углеродистой стали, от коэффициента вытяжки при прессовании [4, 5].

Установлено, что с уменьшением коэффициента вытяжки увеличивается неоднородность структуры горячепрессованных труб, что приводит к большему разбросу данных по длительной пластичности и снижению длительной прочности металла труб. Показано, что такая закономерность в большей степени проявляется в трубах, полученных из заготовки, имеющей развитую зону транскристаллизации с дендритной ликвацией. Выявлено, что структурная неоднородность металла труб наследуется от непрерывнолитой заготовки с грубой макро- и микроструктурой и при прессовании с коэффициентом вытяжки менее 10,0 полностью не устраняется.



а *б*

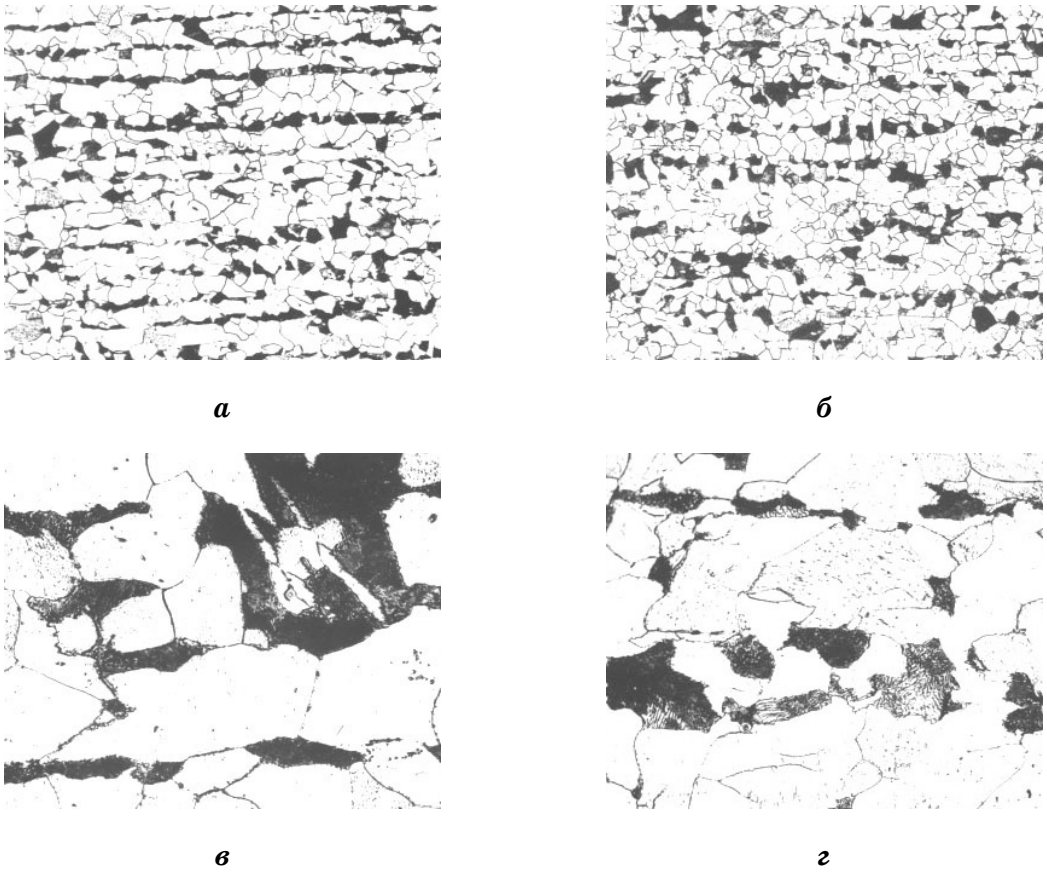
в *г*

Рисунок 2 – Микроструктура металла разрушенных образцов от труб размером 168×26 мм с низкой (а, в) и высокой (б, г) длительной пластичностью. Травление в 5 %-ном растворе HNO3:а, в - δ = 8,8 %; б, г - δ = 29,1 %; а, б - × 100; в, г - × 500

При проведении данных исследований наилучшие результаты получены на металле труб размером 219×26 мм, изготовленных с меньшим коэффициентом вытяжки. Между тем, металл труб размером 168×22 мм, полученных с наиболее высоким коэффициентом вытяжки, при удовлетворительном уровне длительной прочности отличается значительным разбросом значений длительной пластичности.

Такое противоречие свидетельствует о более низком качестве исходной трубной заготовки, из которой были получены трубы размером 168×22 мм (наличие в ней грубой зоны транскристаллизации с ярко выраженной дендритной ликвацией). Наследуемая от заготовки структурная неоднородность металла этих труб полностью не устранилась в процессе прессования и последующей нормализации с отдельного нагрева.

 ISSN 1991-7848



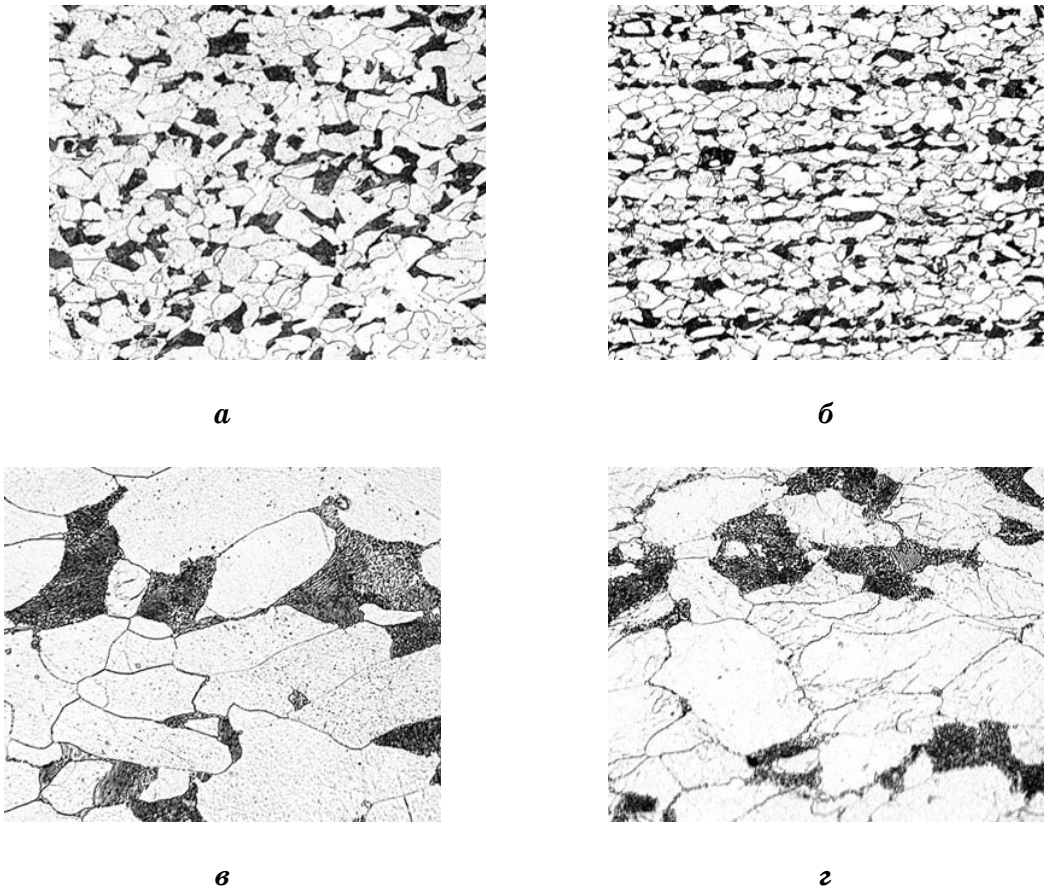
а *б*

в *г*

Рисунок 3 – Микроструктура металла разрушенных образцов от труб размером 168×30 мм с низкой (а, в) и высокой (б, г) длительной пластичностью. Травление в 5 %-ном растворе HNO_3: а, в - $\delta = 8{,}7$ %; б, г - $\delta = 23{,}5$ %; а, б - × 100; в, г - × 500

Заготовка, из которой были изготовлены трубы остальных исследованных типоразмеров, более качественная с точки зрения кристаллического строения. Особенно это касается труб размером 219×26 мм, для производства которых была использована заготовка с развитой зоной равноосных кристаллов и ограниченной зоной транскристаллизации, более дисперсным и однородным строением.

Использование для производства котельных горячепрессованных труб недеформированной непрерывнолитой заготовки разного уровня качества с точки зрения кристаллического строения, не нормируемого нормативной документацией – ТУ 14-1-5319 (с различным соотношением размеров структурных зон и их дисперсностью, с разной степенью дендритной ликвации), приводит к получению неоднозначных результатов испытаний на длительную прочность труб. Прежде всего это касается длительной пластичности металла труб, играющей важную роль при их эксплуатации.



а *б*

в *г*

Рисунок 4 – Микроструктура металла разрушенных образцов от труб размером 219×26 мм с высокой длительной пластичностью. Травление в 5 %-ном растворе HNO3: а, в - δ = 32,0 % (после горячего прессования); б, г - δ = 38,9 % (после нормализации); а, б - × 100; в, г - × 500

При сопоставлении результатов жаропрочных испытаний труб, изготовленных с различными коэффициентами вытяжки из заготовки одной и той же плавки (трубы 168×26 мм, μ = 8,3; 168×30 мм, μ = 7,4), выявленные ранее закономерности подтверждаются. Более низким уровнем длительной прочности (в интервале допустимого ТУ 14-3-460 20%-ного снижения от нормы) характеризуется металл труб размером 168×30 мм.

Для регламентации технологии изготовления таких труб (параметров прессования и режимов термической обработки) и включения их в сортамент ТУ 14-3-460 необходимо проведение жаропрочных испытаний толстостенных труб более широкого диапазона типоразмеров.

 ISSN 1991-7848

ВЫВОДЫ

Установлена возможность получения котельных горячепрессованных труб с толщиной стенки более 20 мм из недеформированной непрерывнолитой заготовки стали 20 с уровнем длительной прочности, удовлетворяющим требованиям ТУ 14-3-460.

Выявлена взаимосвязь длительной прочности и длительной пластичности металла толстостенных котельных горячепрессованных труб из углеродистой стали, изготовляемых из недеформированной непрерывнолитой заготовки, с особенностями их структурного состояния, наследуемого от исходной заготовки.

Установлено, что для получения стабильных и высоких показателей жаропрочности металла труб с толщиной стенки более 20 мм необходимо использовать непрерывнолитоую заготовку с ограниченной зоной столбчатых и развитой зоной равноосных кристаллов с менее выраженной дендритной ликвацией.

Показана необходимость проведения дальнейших исследований жаропрочных свойств металла котельных горячепрессованных труб с толщиной стенки более 20 мм, изготовляемых из недеформированной непрерывнолитой заготовки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ланская А.К. Жаропрочные стали. - М.: Металлургия, 1969. – 247 с.
2. Использование непрерывнолитых заготовок при производстве котельных труб / В.В. Кириченко, Л.В. Опрышко и др. // Сталь. – 1999. - № 12. – С. 40-42.
3. Опрышко Л.В., Ващило Т.П., Кобус А.А. Внедрение непрерывнолитого металла в промышленное производство котельных труб на ОАО «Производственное объединение «Волжский трубный завод» // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2001. - № 1. – С. 56-60.
4. Опрышко Л.В., Вахрушева В.С. Влияние технологических факторов н структуру и эксплуатационные свойства котельных горячепрессованных труб, изготовленных из недеформированнной непрерывнолитой заготовки углеродистой стали // Вісник Придніпровської Державної Академії будівництва та архітектури. – 2006. - № 3 – С. 7-15.
5. Опрышко Л.В., Лубе И.И. Особенности структурообразования металла котельных горячепрессованных труб из недеформированной непрерывнолитой заготовки углеродистой стали // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2006. - № 6. – С. 57-60.

УДК 621.774.35

Семичев А.В., Вышинский В.Т., Данченко В.Н.

ИССЛЕДОВАНИЕ КУЛИСНОГО МЕХАНИЗМА И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К МЕХАНИЗМАМ ПРИВОДА ВАЛКОВ

При виготовленні труб високої якості з тонкою стінкою досягнення високих споживчих властивостей можливо способом холодного пільгерування. Суттєвою перешкодою, що ускладнює процес виробництва, є вісьові сили, що приводять до різних видів браку. Наведено аналіз конструктивних і кінематичних особливостей різних механізмів керування наближенням примусового катаючого радіуса до природнього.

При изготовлении труб высокого качества с тонкой стенкой достижение высоких потребительских свойств возможно способом холодного пильгерования. Существенным препятствием являются осевые силы, приводящие к различным видам брака. Приведен анализ конструктивных и кинематических особенностей различных механизмов управления приближением принудительного катающего радиуса к естественному.

High quality pipes production is possible in the way of cold pilger rolling. The essential obstacle is the axial forces leading to various kinds of a spoilage. It is analyzed kinematics and constructive features of various mechanisms of management by approaching of coercive rolling radius to the natural rolling radius.

На современном этапе развития техники остро стоит вопрос изготовления труб высокого качества с тонкой стенкой, которые используются в авиации, транспортном машиностроении, энергетике и других сферах. Одним из способов их производства с достижением высокого уровня потребительских свойств является холодная пильгерная прокатка.

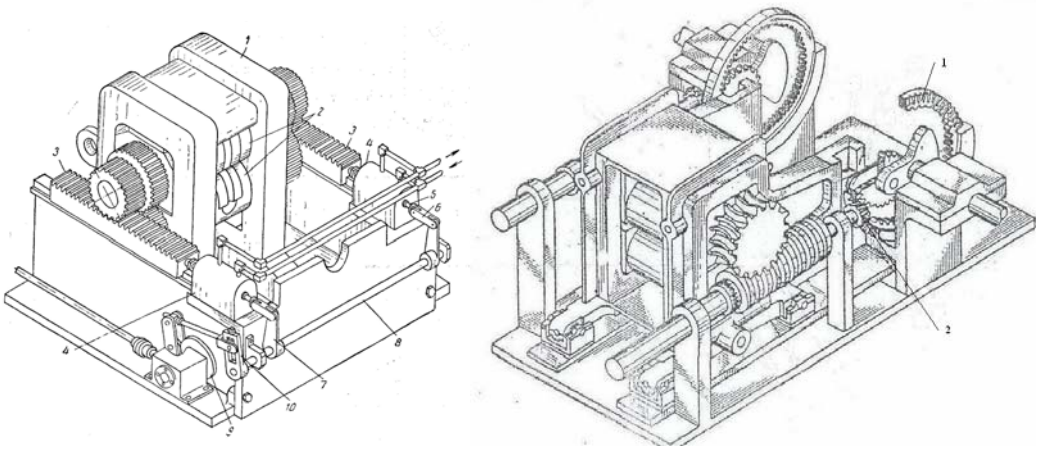


Рисунок 1 - Приводы валков стана ХПТ, обеспечивающие их дополнительный поворот от поршневых гидроусилителей или червячного механизма

© СЕМИЧЕВ А.В., ВЫШИНСКИЙ В.Т., ДАНЧЕНКО В.Н. , 2008

 ISSN 1991-7848

Одной из проблем при производстве тонкостенных труб являются осевые силы значительной величины, которые усложняют процесс производства тонкостенных труб появлением различных видов брака [1, 2]. Известны решения [3, 4], направленные на обеспечение дополнительного поворота валков.

Однако они обладают рядом недостатков. В частности, к недостаткам привода валков с червячным механизмом относятся применение в нём дорогих антифрикционных материалов; ограничение передаваемой мощности (до 50 кВт, тогда как при прокатке тонкостенных труб сортамента станов ХПТ-55, ХПТ-90 требуются мощности порядка 70...100 кВт).

Ю.М. Беликов предложил использовать в приводе валков эксцентричные шестерни, частично обеспечивающие приближение катающего радиуса к естественному, что позволило снизить значения величин осевых сил при прямом ходе рабочей клети на 25% [5].

Основным направлением решения этой задачи являются попытки приблизить принудительный катающий радиус к естественному [6]. Предложен кулисный привод валков стана ХПТ [7], проектируя который авторы исходили из необходимости обеспечения отсутствия скольжения при перекатывании валка по прямой, а значит движения любой его точки по циклоиде. С другой стороны, если центр окружности перемещается по прямой, а произвольную точку на радиусе колеса перемещать по укороченной циклоиде, то само колесо будет перекатываться без скольжения.

Для имитации поведений механизмов в настоящее время широко применяется компьютерное моделирование. Целью данной статьи является анализ кулисного привода валков и разработка требований для проектирования оптимальных механизмов привода. В качестве среды для моделирования выбран программный продукт Simulink. На рис. 2 приведена кинематическая схема привода возвратно-поступательного перемещения клети и кулисного механизма привода валков.

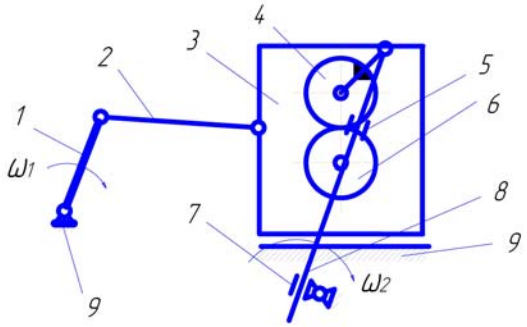


Рисунок 2 - Кулисный механизм привода валков

Привод рабочей клети состоит из кривошипа 1 и шатуна 2. Кулиса 8 соединена с валком 4 через кривошип, который образует с валком одно звено. Ползуны 5 и 7 выполнены таким образом, что могут поворачиваться вслед за кулисой. Исследования структурных особенностей этой кинематической схемы показали, что данный механизм обладает одной степенью свободы. То есть данный механизм содержит одни привод рабочей клети, который также служит и для привода в движение кулисного механизма привода валков.

На рис. 3 (кривая 1) показано как изменяется угловая скорость валков для маршрута 58х3,5-38х1,2 мм, при которой осевые силы минимальны. Положение камня кулисы 5 определяет характер изменения угловой скорости, но совпадение принудительной угловой скорости и естественной происходит только в начале хода рабочей клети.

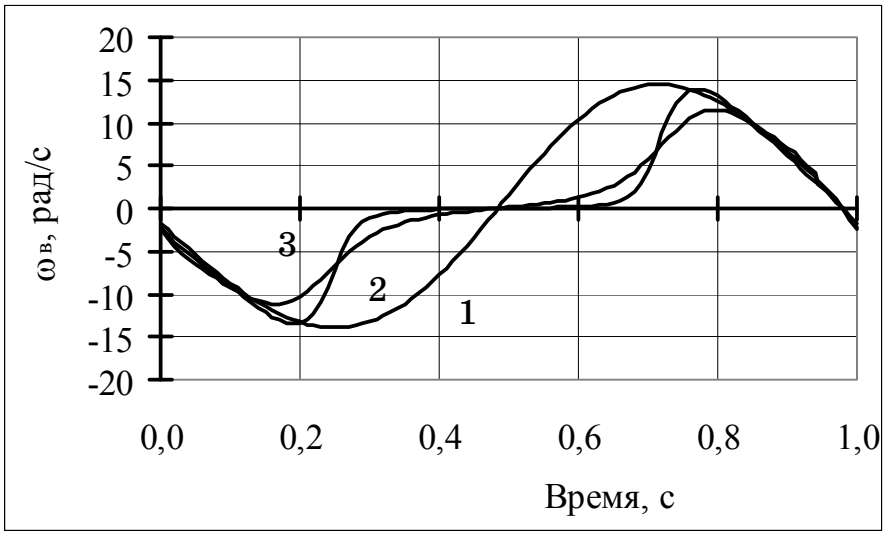


Рисунок 3 - Зависимость угловой скорости валка от времени двойного хода рабочей клети стана ХПТ-55, число двойных ходов в минуту 60: 1 - оптимальная угловая скорость валков, 2-угловая скорость валков при радиусе кривошипа валка 220 мм, длине кулисы 840 мм, расстояние между осью валка и камнем кулисы 157 мм; 3 - угловая скорость при радиусе кривошипа валка 220 мм, длине кулисы 840 мм, расстояние между осью валка и камнем кулисы 200 мм

Еще один параметр, который оказывает влияние на величину угловой скорости это радиус кривошипа валка. На рисунке 4 показано как изменяется угловая скорость при постоянных значениях расстояния между камнем кулисы и осью валка и постоянным значением длины кулисы. Проведенные исследования также показали, что совпадение принудительной и естественной скорости происходит только в начале прямого хода и конце обратного хода рабочей клети.

 ISSN 1991-7848

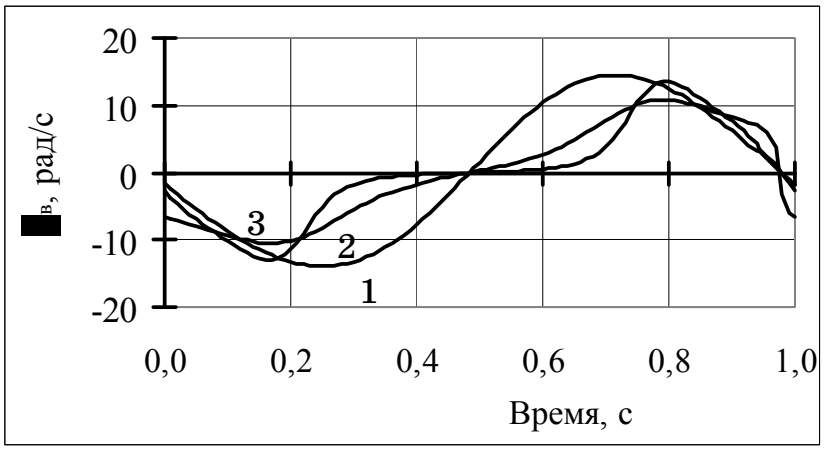


Рисунок 4 - Зависимость угловой скорости валка от времени двойного хода рабочей клети стана ХПТ-55, число двойных ходов в минуту 60: 1 -оптимальная угловая скорость валков, 2 - угловая скорость валков при радиусе кривошипа валка 130 мм, длине кулисы 840 мм, расстояние между осью валка и камнем кулисы 157 мм; 3 - угловая скорость при радиусе кривошипа валка 265 мм

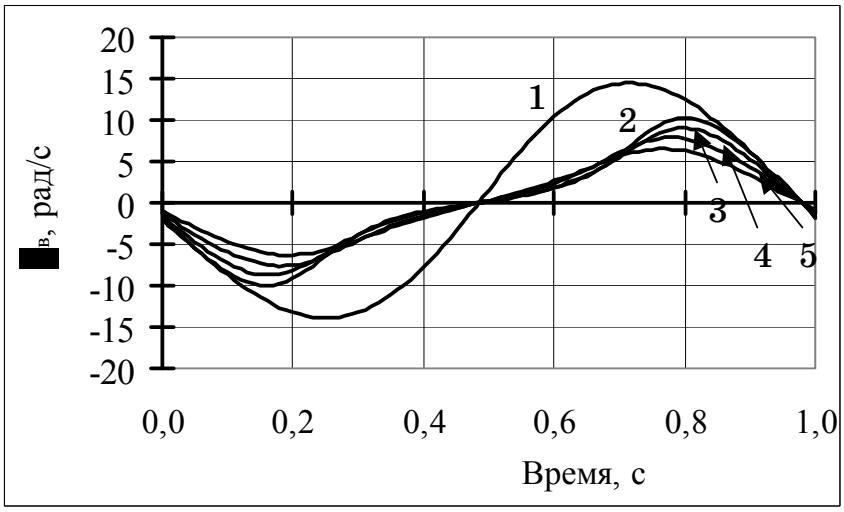


Рисунок 5 - Зависимость угловой скорости вращения валка от времени двойного хода рабочей клети стана ХПТ-55, число двойных ходов в минуту 60: 1-оптимальная угловая скорость вращения валков, 2-угловая скорость при радиусе кривошипа валка 268 мм, длине кулисы 840 мм, расстояние между осью валка и камнем кулисы 200 мм; 3 - угловая скорость при радиусе кривошипа валка 220 мм, длине кулисы 840 мм, расстояние между осью валка и камнем кулисы 200 мм; 4- угловая скорость при радиусе кривошипа валка 220 мм, длине кулисы 995 мм, расстояние между осью валка и камнем кулисы 200 мм; 5- угловая скорость при радиусе кривошипа валка 220 мм, длине кулисы 1100 мм, расстояние между осью валка и камнем кулисы 200 мм

На рис. 5 показано изменение угловой скорости вращения валка при разных значениях радиуса кривошипа валка.

Проведены также исследования влияния изменения положения основания кулисы на изменение угловой скорости вращения валка.

Выводы

Как показали проведенные исследования изменением таких параметров как размеры кривошипа валка, длина кулисы, расстояние между осью валка и камнем кулисы достигнуть необходимого изменения угловой скорости вращения валка невозможно. Необходимы новые эффективные механизмы привода валков, которые бы обеспечили максимальное приближение принудительного катающего радиуса к естественному не на отдельных участках, а по всей длине рабочего конуса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фролов В.Ф., Данченко В.Н., Фролов Я.В. Холодная пильгерная прокатка труб. – Днепропетровск: ПОРОГИ, 2005. – 255 с.
2. Аналіз механізмів зниження вісьових сил на станах ХПТ / В. Ф. Фролов, В. М. Данченко, В. Т Вишинський, А. В. Сьомічев, Я. В. Фролов // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2007. – №1.
3. Рабочая клеть валкового стана холодной прокатки труб. А.с. 329912. СССР. МКИ B21 b17/00/ Вердеревский В.А., Морозов А.А. - № 1154932/22-2; Заявл. 06.05.1967. Опубл. 22.08.1973. Бюл. №34. - 4 с.: ил.
4. Стан холодной прокатки труб: А. с. 1419768. СССР. МКИ B 21 b 21/00 / Ткаченко А.С., Вышинский В.Т., Сафонов Л.А., Гонгадзе О.Л., Крышин С.М. - №1152674/31-02; Заяв. 26.12.86; Опубл. 30.08.88, Бюл. № 5. - 4 с.: ил.
5. Семенов О.А., Кофф З.А., Беликов Ю.М., Одинцов Б.П., Кондратьев В.В., Левейнем А.Г., Гохберг Г.Э., Бирнбаум О.М., Шеремет Я.И. Исследование процесса прокатки труб на станах ХПТ с эксцентричными ведущими шестернями // Сталь. - № 10. – С. 927-929.
6. Розвиток теорії процесів виробництва труб / Під наук. ред. д.т.н., проф. В.М. Данченка. - Дніпропетровськ: Системні технології, 2005. - 260 с.
7. Ткаченко А.С., Шведченко А.А., Климковский Б.М., Мураш И.В. Новый привод валков стана холодной прокатки труб. // Динамика металлургических машин. - М.: Металлургия, 1969 - С. 21-29.

 ISSN 1991-7848

УДК 621. 774. 37

Стасовский Ю.Н.

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ НАНОТЕХНОЛОГИЙ И НАНОМАТЕРИАЛОВ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ПРЕЦИЗИОННОЙ МЕТАЛЛОПРОДУКЦИИ

Показані особливості нанотехнологій та наноматеріалів. Приведені окремі досягнення у світовій практиці щодо застосування нанотехнологій та наноматеріалів при виготовленні прецизійної металопродукції. Визначено перспективи розвитку.

Показаны особенности нанотехнологий и наноматериалов. Представлены отдельные достижения в мировой практике использования нанотехнологий и наноматериалов при изготовлении прецизионной металлопродукции. Определенны перспективы развития.

The peculiarities of nanotechnologies and nanomaterials had been shown. The separate achievements in the world practice of using nanotechnologies and nanomaterials while manufacturing the precision metal products had been presented. The perspectives of development had been determined.

Введение

Вступая в XXI век человечество наметило к реализации стратегическую долгосрочную программу своего развития: постоянная активизация *инновационных процессов* во всех сферах жизнедеятельности (в противовес жесточайшей конкуренции применение передовых, а зачастую высоких и наукоёмких технологий по всей цепочке производственного цикла); совершенствование *структуры производства* (создание прогрессивной эколого-технологической модели производства); повышение *конкурентоспособности* на всех этапах воспроизводства (начиная от проектирования, производства продукта до его реализации за счет снижения цикличности производства и энергоёмкости выпускаемой продукции) [1].

Проблема. Развитие точного и энергетического машиностроения, авиа- и судостроения, космической техники и ядерной энергетики, электротехники, автомобилестроения и других отраслей постоянно вызывает потребность в высококачественной и более наукоёмкой металлопродукции из традиционных и новых материалов, обладающих высокими эксплуатационными свойствами. К такой категории продукции относятся *прецизионные трубы, фольга, тончайшая проволока и др.* [2,3]. При этом наблюдается устойчивая тенденция в *миниатюризации* изделий с оптимальными эксплуатационными характеристиками. Естественно постоянно повышаются требования к прецизи-

© СТАСОВСКИЙ Ю.Н., 2008

онной металлопродукции. В ряде случаев существующие массовые технологии производства практически достигли своих теоретических пределов и нуждаются в кардинальном обновлении.

Анализ исследований. В этой связи новый толчок в своем развитии получила не только *металлургия* (в части выплавки помимо качественных сталей и сплавов на основе цветных металлов с высокой чистотой и новыми свойствами, а также материалов нового класса – прецизионных сплавов с регламентированными физико-химическими и физико-механическими свойствами), но и *машиностроение* (в части изготовления прецизионного оборудования и технологического инструмента для изготовления металлопродукции другого, более высокого уровня качества).

В настоящее время особая роль отводится развитию наукоёмких отраслей производства с высоким уровнем добавленной стоимости. На современном этапе развития мировой экономики к таким направлениям, безусловно, следует относить *нанотехнологии* [4]. Они требуют малых затрат энергии, материалов, не нуждаются в обширных производственных и складских помещениях. С другой стороны, их развитие требует высокого уровня подготовки ученых, инженеров и технических работников, а также особой организации производства. В основе научно-технического «прорыва на наноуровне», форсируемого промышленно развитыми странами, лежит использование новых, ранее не известных свойств и функциональных возможностей материальных систем при переходе к наномасштабам, определяемым особенностями процессов переноса и распределения зарядов, энергии, массы и информации при наноструктурировании. Многие из кардинально отличных свойств наноматериалов по отношению к объемным того же химического состава обусловлены эффектами многократного увеличения доли поверхности нанозерен и нанокластеров (до сотен квадратных метров на грамм). С этим связаны новые свойства многих конструкционных и неорганических наноматериалов.

В нанотехнологиях управляющая информация передается нанозондом персонально каждому атому и молекуле «силовым методом». В этом скрыто принципиальное отличие нанотехнологий от традиционных, где поток управляющей информации подается исходному материалу как целому.

В сферу этой деятельности подпадают объекты с размерами (хотя бы вдоль одной координаты), измеряемыми нанометрами. Это ничтожно малая величина, сопоставимая с размерами атомов. Нанотехнология имеет дело с осуществлением технических процессов на

 ISSN 1991-7848

молекулярном уровне, т.е. инженеры имеют дело со сверхмалыми частицами размером до 1 нм (или одной миллиардной метра). Исследователи обнаружили, что вещество на атомном уровне ведет себя совершенно иначе.

В этом и заключается задача нанотехнологий: найти атом с необходимыми свойствами и поставить на правильное место.

Незначительная доля наночастиц трансформирует знакомые материалы до «неузнаваемости» - настолько, что в них начинают проявляться совершенно неожиданные и полезные свойства. Они сегодня заложены в основу большинства инновационных решений во всех сферах ежедневного способа производства. Такая интегрирующая роль выдвигает их на одно из первых мест в сфере критических технологий, без развития которых сегодня ни одно государство мира не может претендовать на конкурентный технологический прогресс и создание своей интеллектуальной собственности в сфере науки и технологий.

Есть два главных способа создания наноматериалов. Один из них - «снизу-вверх». Эти методы предполагают, что наноструктуры с заданными свойствами формируются последовательно из атомов и молекул, от мельчайших объемов - к более крупным. Этот путь развития нанотехнологий связан, в первую очередь, с использованием дорогостоящей аппаратуры.

Есть и второй путь - «сверху-вниз», или от объемного материала - к высокодисперсным (т.е. мельчайшим) частицам. Он не требует таких больших затрат, к тому же, в Украине есть определенный задел в этой области исследований, так что тут определенно можно получить результат.

Исследования в суперсовременной области требуют соответствующих инструментов. В данном случае - мощнейших микроскопов (электронных, туннельных), а также с использованием ядерно-магнитного резонанса. Такие приборы в Украине есть (в ряде институтов Национальной академии наук Украины), так что их следует собирать для крупных центров, объединяющих усилия ученых разных специальностей, с целью коллективного использования.

Нанопорошки все чаще находят применение в качестве наполнителей для новых материалов и композитов, компонентов многих покрытий и др.[5].

Получает развитие научное направление *квантовое материаловедение*. Свойства материалов в значительной мере определяются микроструктурой, формируемой в процессе термической и механиче-

ской обработки. Возникает она как результат фазовых превращений в материале.

В настоящее время к основным нанотехнологиям, распространенным, например, в цветной металлургии, следует отнести следующие: доведение размеров порошков до наноразмеров (порошковая металлургия); получение фольги и лент с помощью контролируемой скорости охлаждения при их кристаллизации; использование методов интенсивной пластической деформации литых и порошковых заготовок; совершенствование микроструктуры и создание новых материалов на основе эффектов дисперсионного твердения и дисперсного упрочнения (нанофазность).

ОАО «Институт Гипроцветметобработка» (Российская Федерация) успешно решает задачи с помощью разработки и практической реализации в промышленном масштабе новых дисперсионно-твердеющих сплавов. Для низколегированных медных сплавов реализуется теория создания многофазных дисперсионно-твердеющих сплавов, где каждая из образующихся в сплаве фаз «несет ответственность» за свою температурную область его упрочнения (эстафетное, или каскадное упрочнение). Созданы новые дисперсионно-твердеющие медные сплавы на базе сплавов, упрочняемых обычно холодной деформацией, когда варьированием режимов термической и термомеханической обработки достигается измельчение их макроструктуры, изменяется характер распределения фазовых составляющих и ликвационных процессов в системе, растет технологичность металлургического производства полуфабрикатов.

Нанотехнологии находят применение при *металлообработке* (в процессах обработки металлов давлением). Развиваемые в условиях Института проблем сверхпластичности металлов РАН и ОАО «Институт Гипроцветметобработка», *нетрадиционные методы деформации* - такие как кручение под гидростатическим давлением, равноканальное угловое прессование (РКУП - на чистой меди удалось увеличить более чем на порядок предел текучести), мультиосевая деформация, знакопеременный изгиб, винтовое прессование и др. - обеспечивают деформирование заготовки без изменения сечения и формы при достижении необходимых высоких степеней деформации и измельчения зерна. Обычные методы деформации (прокатка, волочение, прессование и др.) в конечном счете, приводят к уменьшению поперечного сечения заготовок и не дают возможности достигать больших степеней измельчения зерна. Кроме того, в ОАО «Институт Гипроцветметобработка» разработаны технологии, совмещающие горячую пластиче-

 ISSN 1991-7848

скую деформацию с закалкой и старение с теплой деформацией или с кратковременным нагревом под пайку.

Неисследованные направления в Украине. В целом можно отметить, что производство прецизионной металлопродукции (труб, фольги, тончайшей проволоки и др.) напрямую связано с нанотехнологиями в металлургии.

Украина является одной из немногих стран мира (среди таких развитых стран, как: США, Германия, Япония, Франция, Финляндия, Швеция, Англия, Италия, Россия), имеющая мощности и научно-технический потенциал, позволяющий производить прецизионные трубы [7].

Основными производителями прецизионных труб в Украине являются 7 трубных заводов. В начале 2007 г. ОАО «Днепропетровский трубопрокатный завод» также заявил о своих намерениях до 2008 г. организовать производство прецизионных труб в трубоволочильном комплексе (объединении двух ТВЦ).

Сейчас прорабатывается вопрос о строительстве до 2013 года на промплощадке ОАО «Сумское машиностроительное производственное объединение им. Фрунзе» современного мини-завода по спецметаллургии и производству прецизионных труб из циркониевых сплавов для ТВЭЛов АЭС.

В XXI веке науку и технику ожидают эпохальные преобразования, которые приведут к коренным изменениям в производстве и социальной жизни.

Цель. Безусловно, современное направление развития нанотехнологий и наноматериалов для базовой отрасли экономики Украины является перспективным и «прорывным», по этой причине это направление развития в XXI веке для Украины является актуальным.

Результаты исследований. В Государственном предприятии «Научно-исследовательский трубный институт (ГП «НИТИ», Украина) автором этой статьи выполнен комплекс исследований при изготовлении прецизионных труб малых размеров с микронными стенками (диаметром менее 20 мм и толщина стенки 0,03 мм и менее) из прецизионных сплавов, в частности, на основе титана, с применением процесса волочения на подвижной оправке и последующей термопластической деформации (совместного нагревания и охлаждения системы «оправка-труба» для создания зазора между трубой и оправкой для последующего извлечения оправки из трубы)[6]. После этой операции в металле готовых труб образовывалось супертонкое зерно, получить которое традиционными способами изготовления не удавалось.

В 80-тые годы прошлого столетия в ГП «НИТИ» были проведены успешные опыты по изготовлению труб из газофазного вольфрама с применением процесса теплого волочения на подвижной оправке с подпором, основанным на эффекте различия температурных коэффициентов линейного расширения материалов трубы и оправки.

Перспективные направления исследований. К развитию нанотехнологий и наноматериалов в металлургии необходимо подходить комплексно, по всей технологической цепочке от сырья до готовой продукции.

Минерально-сырьевая база. В Украине на данный момент недостаточное качество железорудного сырья. Имея в стране небогатую по содержанию железа руду, можно и нужно думать о повышение конкурентоспособности сырья для отечественных металлургов. Например, в Японии компании „Kobe Steel” и „Mildrex” изобрели новый способ получения из низкосортной руды концентрата с 96-98% содержанием железа [1].

В Украине накоплены значительные объемы отходов промышленного производства, в которых содержится широкий спектр полезных элементов [8]. Развитие этого направления путем извлечения полезных элементов из отходов с применением новейших наукоёмких технологий безусловно даст новый импульс развитию отечественной качественной металлургии и производству прецизионной металлопродукции [9].

Очень важно иметь в виду, что 5-7% веществ в воде морей и океанов находятся в виде наночастиц. Развитые страны мира активно проводять исследования минеральных ресурсов Мирового океана и, в связи с этим, параллельно интенсивно развивается новое направление металлургической отрасли [4].

Выплавка чугуна. Производство чугунных труб в мире непрерывно растет с использованием в качестве исходного сырья высокопрочного чугуна с шаровидным графитом (ВЧШГ). Этот чугун имеет ряд преимуществ по сравнению со сталью и серым чугуном. В перспективе могут быть другие наноструктурные чугуны [10].

Выплавка стали. Нанотехнологии могут развивается при разработке наноструктурных марок сталей (или классов), которые должны отвечать современным требования и требованиям ближайшей перспективы, в первую очередь, комбинированным требованиям: высокие прочность, пластичность и ударная вязкость.

Прецизионная металлопродукция (трубы, проволока, фольга и др.). В последнее время возникает потребность в *суперпрецизионной*

 ISSN 1991-7848

металлопродукции, которую изготавливать на действующем «*макрооборудовании*» уже технически и практически стало невозможным. Необходимы прогрессивные *прецизионные нанотехнологии*. Кроме того, традиционные материалы и даже известные прецизионные сплавы иногда не обеспечивают тот необходимый комплекс свойств, которые требуют современные условия использования прецизионной металлопродукции. Традиционные способы обработки металлов давлением (ОМД) также уже не обеспечивают получение необходимой структуры металла в готовых прецизионных изделиях из-за недостаточно интенсивной деформации. Необходимо разрабатывать новые наукоемкие *комплексные технологии* с целью обеспечения интенсивной пластической деформации с применением традиционных процессов ОМД под последующим или напосредственным влиянием на металл различных физических процессов (нагрева, охлаждения, колебаний, излучений, электрического тока и др.) [11].

Сварные трубы. Применение сварных труб с каждым годом расширяется, кроме традиционных отраслей потребления (магистральные нефте- и газотрубопроводы высокого давления и др.) они используются в ядерной технике, конструкционных сооружениях, «трубчатых изделиях» и др.[12,13]. Современные требования к сварным трубам большого диаметра вынуждают их производителей увеличивать толщину стенки трубы до 40 мм, в то время, когда японские исследователи и производители таких труб добились повышения прочности сварного шва за счет получения супермелкой структуры в зоне сварного шва, что значительно (в несколько раз) повысило его прочность. В общем процессы сварки являются серьёзным объектом применения нанотехнологий и присадочных наноматериалов.

Выводы

Существующие предприятия-производители прецизионной металлопродукции в Украине нуждаются в коренной реконструкции и модернизации, внедрении наукоёмких технологий. В числе приоритетов при производстве прецизионной металлопродукции должны стать нанотехнологии и наноматериалы.

Безусловно, рассмотренные направления могут быть реализованы в Украине в разные сроки: краткосрочные (1-3 года), среднесрочные (3-5 лет) и долгосрочные (на протяжении 10-15 и более лет).

В зависимости от уровня и стабильности финансирования, организации исследований; научно-технического потенциала, который будет привлечен к таким работам и других влияющих условий сроки

разработок, исследований и внедрения в промышленность могут быть более сжатыми.

ЛИТЕРАТУРА

1. Стасовский Ю.Н. Стратегия инновационного развития горно-металлургического комплекса региона // Экономика Украины.- 2005.-№2.- С.29-37.
2. Стасовский Ю.Н. Прецизионные трубы // Металл и литье Украины.- 2008.-№1.- С.39-57.
3. Стасовский Ю.Н. О технологических особенностях производства прецизионных изделий из цветных металлов // Металл и литье Украины.- 1997.-№8-9.- С.38-42.
4. Стасовский Ю.Н. Нанотехнологии в металлургии: состояние, проблемы, перспективы // Металл Бюллетень. Украина.- 2007.-№8 (122).- С.118-130.
5. Стасовский Ю.Н. Нанотехнологии в металлургии и машиностроении – приоритетное направление развития в XXI веке / Сборник материалов V международной научно-практической конференции «Перспективы развития горно-металлургического комплекса – направляющий вектор машиностроения», Днепропетровск.- 2007. С. 90-100.
6. Стасовский Ю.Н. Развитие теории и совершенствование технологии производства холоднодеформированных прецизионных труб с применением процессов волочения / Материалы международной конференции «Трубы-Украина-2007», Днепропетровск.- 2007. С. 456-473.
7. Стасовский Ю.Н. Мировая трубная промышленность. XXI век // Экономика Украины.- 2008.-№4. - С.19-37.
8. Стасовский Ю.Н. Перспективные возможности Украины по обеспечению цветными металлами с использованием собственного сырья // Металл и литье Украины, 2001.- №10-11.- С. 3-5.
9. Стасовский Ю.Н. Структура потребления полуфабрикатов из цветных металлов в Украине // Металл и литье Украины, 2001.- №1-2.- С. 3-5.
10. Стасовский Ю.Н. Высокопрочный чугун – металл завтрашнего дня // Металл Бюллетень. Украина, 2006.- №8 (110).- С. 74-77.
11. Стасовский Ю.Н. Термопластическая деформация при волочении прецизионных труб на подвижной оправке // Сталь.- 1999.- №7.- С. 53-57.
12. Стасовский Ю.Н. Современный уровень технологии и оборудования производства товарных и передельных сварных труб из цветных металлов и перспектива развития их производства // Цветные металлы.- 2001.- №3.- С. 68-71.
13. Стасовский Ю.Н. Точная настройка. Ресурсосберегающие технологии производства прецизионных труб в условиях мини-производств с использованием сварной заготовки // Металл Бюллетень. Украина, 2007.- №7 (121).- С. 96-109.

 ISSN 1991-7848

УДК 621. 774.37

Стасовский Ю.Н.

НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРОИЗВОДСТВА ПРЕЦИЗИОННЫХ ТРУБ МАЛЫХ РАЗМЕРОВ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К УСЛОВИЯМ МИНИ-ПРОИЗВОДСТВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТОНКОСТЕННОЙ СВАРНОЙ ЗАГОТОВКИ

Розглянуто світові тенденції організації міні-виробництв прецизійних труб малих розмірів із використанням зварної заготовки. Проведено експериментальні дослідження наскрізних технологій. Запропоновано концепцію організації міні-виробництва в умовах України та розроблено наукові основи ресурсозберігаючої технології.

Рассмотрены мировые тенденции организации мини-производств прецизионных труб малых размеров с использованием сварной заготовки. Проведены экспериментальные исследования сквозных технологий. Предложена концепция организации мини-производства в условиях Украины и разработаны научные основы ресурсосберегающей технологии.

The world trends in organization of mini works for manufacturing small dimension precision tubes with using the welded billet had been considered. The experimental investigations of the through technologies had been carried out. Conception of mini works organization in condition of Ukraine had been offered and the scientific foundations of resource–saving technologies had been developed.

Введение

Развитие приоритетных отраслей промышленности: приборостроения, электроники, медицины, авиа- и судостроения и других обуславливает постоянно возрастающую потребность в *прецизионных трубах малых размеров*, требования по качеству к которым с каждым годом возрастают. Наиболее потребляемый в настоящее время сортамент прецизионных холоднодеформированных труб: наружный диаметр менее 40 мм вплоть до 0,1 мм (с минимальной толщиной стенки до 0,017 мм) из широкого спектра материалов (чёрные и цветные металлы и сплавы) [1].

Основной мировой тенденцией при изготовлении таких труб является уменьшение объема холодной обработки за счет приближения размеров заготовки к готовому изделию (например, использование сварной тонкостенной трубной заготовки), интенсификация режимов холодной обработки, увеличение производительности труда в результате применения высокопроизводительных процессов волочения [2]. Сварные прецизионные трубы находят широкое применение как товарные в приоритетных отраслях, а также их используют в качестве передельной заготовки при изготовлении холоднодеформированных прецизионных труб малых размеров [3].

© СТАСОВСКИЙ Ю.Н. , 2008

Проблема. Высокие цикличность и трудоемкость обуславливают высокую себестоимость прецизионных труб, изготавливаемых по традиционной технологии. На протяжении длительного времени в Украине проводились комплексные исследования, направленные на разработку оборудования и технологий для производства прецизионной передельной сварной трубной заготовки для изготовления прецизионных труб малых размеров. Несмотря на это, в Украине на данный момент отсутствует соответствующее современное мобильное ресурсосберегающее мини-производство [4].

Анализ исследований. При производстве сварных тонкостенных труб из широкого спектра материалов применяются современные способы сварки: *аргонно-дуговая (АДС), лазерная, микроплазменная и другие* [3].

В работе [4] подробно рассмотрены специфические особенности формовки и сварки тонкостенных труб из различных материалов: из чистой меди; технической меди и латуни; из алюминия и его сплавов; из титановых сплавов; из сплавов на никелевой основе.

Значительных успехов в разработке ресурсосберегающих технологий, производстве специализированного оборудования и собственно промышленном производстве качественных сварных труб из различных материалов, что заслуженно позволило занять лидирующее место в мире, добились ряд зарубежных фирм [3]. Так, фирмой «SMS» (ФРГ) оказывается широкий спектр услуг по планированию и проектированию комплексных установок и технических систем для изготовления сварных труб, строительству под «ключ» современных цехов и мини-заводов. Фирма «Я-ро» (Финляндия) достигла успехов в производстве сварных труб из титана и сплава системы 90Cu-10Ni. Фирма «Keller» (ФРГ) известна как разработчик и изготовитель высокопроизводительных трубосварочных агрегатов непрерывного типа с лазерной сваркой в среде аргона для производства труб размерами 17-114 х 1,0-4,0 мм. Фирма «W.F.Oppermann» (ФРГ) занимается разработкой и изготовлением оборудования для производства сварных труб с наружным диаметром от 6 до 273 мм и толщиной стенки от 0,2 до 8,0 мм; применяемые методы сварки: лазерная и др.; применение линии светлого отжига, интегрированного редуцирования и волочения сварных труб [3]. Этой же фирмой запатентована линия производства холоднодеформированных прецизионных труб максимальным диаметром 60 мм по сквозной технологии по схеме «расплав – непрерывная отливка слябов – прокатка полосы – раскрой полосы по ширине – формовка полосы в трубы – сварка труб – холодная деформация». Фирма «MAS Seuthe GmbH» (ФРГ) [3] изготавливает специализированные линии для производства сварных труб размерами 10-16х0,5-1,2 мм и длиной 3-7 м по схеме «разделка полосы - фор-

 ISSN 1991-7848

мовка - сварка- редуцирование-отделка» с последующим наматыванием холоднодеформированных труб малого диаметра (4,76-6,0 мм) на барабаны.

В России ведутся работы по проектированию и изготовлению трубосварочных станов, разработке и освоению современных ресурсосберегающих технологий по изготовлению сварных труб. Значительных успехов достигли: ОАО «Институт Гипроцветметобработка», ОАО «ВНИИМетМаш, ОАО «ВИЛС» и др. Так, ОАО «Институт Гипроцветметобработка» спроектированы и изготовлены станы модели АДТС 8-25-1, на которых производят длинномерные тонкостенные трубы в бунтах из меди и латуни, а также стан ТЭСА 15-50 для сварки ТВЧ латунных труб диаметром до 50 мм. Институтами ОАО «ВНИИМетМаш» и ОАО «ВИЛС» также разработаны новые технологии сварки ТВЧ алюминиевых труб.

В Украине разработкой технологии и оборудования для изготовления сварных труб занимаются Институт электросварки им. Е.О.Патона НАНУ и другие организации.

Развитие лазерной сварки труб получило в странах Западной Европы, в Японии, США и других развитых странах [3]. Например, в ядерной энергетике США и Великобритании успешно применяют лазерную сварку реакторных элементов из коррозионностойких сталей, а в Японии и Германии лазерную сварку применяют при сварке труб из нержавеющих сталей ферритного класса.

В России и Украине проводились целевые работы по внедрению лазерной сварки при производстве труб [3, 4]. В работе [4] отмечается, что основные исследования были проведены в лабораторных и производственных условиях Украины - Государственное предприятие «Научно-исследовательский трубный институт» (ГП «НИТИ»), ОАО «Новомосковский трубный завод»; России - Научно-исследовательский центр «Технологические лазеры» РАН, ОАО «Московский трубный завод» (ныне - ОАО «ФИЛИТ»).

В Украине исследования проводились: в ГП «НИТИ» - с использованием лазера УЛГ 2,01 (мощность 2кВт) и стана типоразмером «6-15», а также с использованием твердотельного лазера ЛТН с опытным станом по производству сварных труб размером 3х0,25мм из коррозионностойких сталей; в условиях ОАО «Новомосковский трубный завод» на ТЭСА 20-76 были проведены опыты по лазерной сварке труб из стали 12Х18Н10Т с использованием лазерной установки ЛТ 1-Б.

В России с 1990 г. в условиях ОАО «ФИЛИТ» применяют лазерную сварку труб размером 38х1,5 мм из стали марки 08Х18Н10Т на ТЭСА «20-76».

Неисследованные вопросы. В настоящее время, несмотря на накопленный мировой опыт по производству сварных труб из чёрных и цветных металлов, усилия разработчиков многих фирм и предприятий направлены на создание новых и совершенствование существующих технологий и оборудования по производству прецизионных сварных труб.

Цель. На решение существующих в Украине проблем направлены исследования, результаты некоторых из них приведены в данной статье. Целью проводимых экспериментов в лабораторных и промышленных условиях являлось определение требований к заготовке, полученной различными способами сварки, выбор наиболее оптимального способа сварки для конкретного материала и сортамента изготавливаемых труб.

Результаты исследований. В условиях ГП «НИТИ» проводились исследования по изучению влияния способа сварки, формы и структуры шва, способа деформации (прокатка, оправочное и безоправочное волочение) на точность, качество и равномерность свойств по сечению готовой трубы, а также оценка технико-экономических параметров разных способов получения труб малых размеров [4]. При этом изготавливали прецизионные трубы из заготовки полученной: *АДС* (на стане «АДСТ 6-30» ОАО «ФИЛИТ» получены трубы размерами 10х1,0 и 10х1,2 мм, длиной до 40 м), *микроплазменной сваркой* (на стане «6–10» ГП «НИТИ» получены трубы размерами 8,0 х 1,0–1,2 мм и длиной до 30 м), *лазерной сваркой* (на стане «6–15» ГП «НИТИ», а также на опытном стане изготовили трубы размером 3 х 0,25 мм из коррозионностойкой стали). Использовали также сварные трубы-заготовки, полученные: АДС из меди М1, латуни Л63, коррозионностойких сталей аустенитного класса; *микроплазменной* и *лазерной* сваркой из стали 12Х18Н10Т; *сваркой ТВЧ* из алюминиевого сплава АД1. Проведен комплексный сравнительный анализ: формы, макро- и микроструктуры шва сварных труб из стали 12Х18Н10Т, полученных тремя видами сварки: АДС (размером 12,0 х 1,0 мм), микроплазменной (размером 12,0 х 1,0 и 8,0 х 0,4 мм) и лазерной (размером 8,0 х 0,4 и 3,0 х 0,25 мм), а также их изменение при деформировании труб с радиальным обжатием стенки и при безоправочном волочении.

С использованием этих заготовок были изготовлены трубы размером 1,5 х 0,3 мм, которые имели более высокую точность по толщине стенки (почти в 2 раза) по сравнению с трубами, *изготовленными* из бесшовной заготовки. Трубы размером 12,0 х 1,0 мм подвергали прокатке (суммарный коэффициент вытяжки $\mu = 3 - 4$), волочению на подвижной оправке ($\mu = 2 - 2,5$) и без оправки ($\mu = 1,2 - 1,5$).

 ISSN 1991-7848

Трубы размером 8,0 х 0,4 мм подвергали волочению на оправке (μ = 2 - 2,5) и без оправки (μ = 1,2 - 1,5). Трубы размером 3,0 х 0,25 мм подвергали только волочению без оправки (μ = 1,3 -1,5).

От труб-заготовок и от передельных труб после каждого цикла деформации отбирали образцы для контроля: геометрических размеров по сечению трубы; чистоты наружной и внутренней поверхностей; макро- и микроструктуры металла в поперечном сечении трубы. Как показали исследования труб-заготовок, полученных различными способами сварки, макроструктура шва плотная, без пор и раковин; на наружной поверхности труб грат отсутствует. Форма и высота грата на внутренней поверхности труб существенно зависит от способа сварки. На трубах, полученных лазерной сваркой, шов узкий и грат отсутствует. Трубы после микроплазменной сварки имеют большую ширину шва и высоту грата. Наибольшая высота грата и ширина шва наблюдается на трубах, полученных АДС. Соотношение высоты грата после лазерной, микроплазменной и АДС сварок соответственно составляет 1:1,5:2,8. Также были проведены опыты по изготовлению длинномерных (до 50 м) капиллярных труб из стали 12Х18Н10Т с использованием сварной заготовки, полученной методами АДС и микроплазменной сварки. Сразу выявились преимущества лазерной сварки при получении тонкостенных трубных заготовок. Сравнительный анализ показал, что наилучшие показатели качества (чистота поверхности, ширина шва, форма грата) имеют трубы, полученные лазерной сваркой.

Полученные готовые трубы размером 1,5 х 0,3 мм из сварной трубной заготовки, полученной различными способами сварки, были подвергнуты комплексному контролю. Результаты контроля показали, что точность геометрических размеров труб, полученных из разных заготовок практически не отличается (разностенность в пределах 0,03 мм), но в 2 раза ниже по сравнению с требованиями ГОСТ 14262-85. Применение сварной заготовки позволяет сократить расходный коэффициент металла с 5,5 до 2,1, снизить при этом трудоемкость и цикличность в 5–8 раз.

На основании проведенных исследований разработана концепция [2] организации мини-производств по изготовлению сварных прецизионных товарных и передельных труб унифицированных размеров [5] из черных и цветных металлов с применением современных способов сварки. Реализацию новой концепции необходимо осуществлять комплексно по нескольким направлениям.

Первым направлением является создание оборудования для получения прецизионных сварных труб унифицированных размеров.

Вторым направлением является создание оборудования для холодной деформации сварных труб-заготовок в трубы малых размеров.

Третьим направлением является разработка новых жидких эффективных технологических смазок.

Четвертым направлением является комплексный подход к определению сортамента, технологий и оборудования, позволяющий гибко реагировать на требования рынка, соответственно при минимальных затратах времени на перестройку.

Была также предложена концепция [4] целесообразности применения современных методов сварки, в первую очередь лазерной сварки, при производстве прецизионных тонкостенных труб малых размеров, которая заключается в следующем.

Основополагающим условием при организации производства прецизионных труб малых размеров является разработка и освоение сквозной ресурсосберегающей технологии, основная цель которой - гарантированное обеспечение конкурентоспособности продукции [1]. Это должно достигаться за счет: использования высококачественной исходной заготовки (штрипс, лента); применения надежного и высокопроизводительного, простого в обслуживании ресурсосберегающих оборудования и оснастки. Технологический инструмент (волоки, оправки) для холодного волочения должен обеспечивать необходимую точность труб, а технологические смазки призваны обеспечить высокую чистоту поверхности труб и легко удаляться после деформации не ухудшая экологическую ситуацию.

В качестве первых *базовых* были предложены технологии, учитывающие следующие подходы:

• *геометрические параметры* сварной трубы-заготовки выбираются таким образом, что бы при дальнейшем холодном волочении можно получить готовую трубу с необходимыми точностью, чистотой поверхности и механическими свойствами;

• *исходной заготовкой* для производства сварных труб служит высокачественная лента с расчетными размерами и точностью;

• *изготовление сварной трубы-заготовки* - пластические свойства металла сварного шва должны обеспечивать проведение холодной деформации (волочение или прокатка) без промежуточных отжигов (лазерная сварка), либо волочение или прокатку на оправке для достаточной проработки металла сварного шва при других методах сварки;

• *регламентированные* деформационно-скоростные параметры при волочении, с целью разупрочнения металла и исключения (или

 ISSN 1991-7848

максимального сокращения) промежуточных отжигов, а так же обеспечение высоких механических свойств;

• *применение способов волочения на оправке* (подвижной, закрепленной и самоустанавливающейся);

• сварные трубы-заготовки в бунтах целесообразно применять диаметром от 20,0 до 2,0 мм и толщиной стенки от 1,0 до 0,1 мм;

• *для получения необходимой толщины стенки трубы* в регламентированном допуске (от +/- 0,005 до +/-0,02 мм) волочением целесообразно применять *безоправочное волочение* через несколько волок (2-3) с варьированием деформацией (комбинация с большими и малыми обжатиями) для управления изменением стенки в пределах 5-10% от ее толщины, *волочение на длинной подвижной оправке* для осуществления значительной деформации по толщине стенке ($\mu \leq 4{,}0$), *волочение на короткой закрепленной оправке (*в т.ч. с использованием усиленных оправок, а также сборных оправок с алмазной составляющей [2,4]) при производстве прецизионных труб с повышенным качеством поверхности и для финишного волочения готовых труб, *волочение на самоустанавливающейся оправке* для бухтового волочения труб из цветных сплавов и коррозионностойких сталей;

• *разрабатываемое оборудование* должно отвечать следующим требованиям: невысокая первичная и восстановительная стоимость оборудования; минимальная энерго- и металлоемкость; минимальное использование энергоносителей (электроэнергия, вода, сжатый воздух, пар); минимальное воздействие на окружающую среду; минимальное время на ремонт и восстановление; простота в обслуживании; многофункциональность; возможность быстрой (мобильной) переналадки и перехода с одного вида продукции на другой; возможность использования различных видов исходной заготовки.

Новое мини-производство может быть оснащено следующим оборудованием [4]:

• универсальный линейный волочильный стан, работающий со всеми способами волочения;

• барабанный волочильный стан.

Кроме перечисленного основного технологического оборудования, современный производственный участок комплектуется вспомогательным оборудованием: машина для забивки головок на трубах, печь для светлого отжига (в вакууме или защитной газовой среде), правильная машина, ванны для промывки готовых труб и др.

Перспективные направления исследований. Разработчики ведущих зарубежных фирм идут по пути дальнейшего повышения качества сварного шва труб на основе оснащения трубоэлектросварных станов современными системами контроля качества, такими как ультразвуковые толщиномеры и дефектоскопы, оптикоэлектронные системы определения ширины шва, термоэлектрические системы, радиографический и лазерный контроль.

Выводы

Предложены научно обоснованные и экспериментально подтвержденные концепция организации мини-производства и ресурсосберегающая технология по изготовлению прецизионных труб малых размеров из широкого спектра материалов с использованием прецизионной сварной тонкостенной заготовки, которые отвечают современным мировым требованиям и тенденциям.

ЛИТЕРАТУРА

1. Стасовский Ю.Н. Прецизионные трубы // Металл и литье Украины.- 2008. - №1. - С.47-51.
2. Стасовский Ю.Н., Верещагин А.А. Прогрессивные ресурсосберегающие экологически безопасные технологии производства прецизионных труб малых размеров // Сталь.- 2000.- №7.- С.51-56.
3. Стасовский Ю.Н. Современный уровень технологии и оборудования производства товарных и передельных сварных труб из цветных металлов и перспектива развития их производства // Цветные металлы.- 2001.- №3.- С.68-71.
4. Стасовский Ю.Н. Точная настройка Ресурсосберегающие технологии производства прецизионных труб в условиях мини-производств с использованием сварной заготовки // Металл Бюллетень. Украина. - 2007. - №7 (121). - С.96-109.
5. Стасовский Ю.Н. Выбор критериев определения унифицированных размеров трубной заготовки для производства прецизионных труб // Металлургическая и горнорудная промышленность, 2000, №8-9, С.351-352.

 ISSN 1991-7848

621.777

Терещенко А.А., Дехтярев В.С., Фролов Я.В.

ПАРАМЕТРЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ТРУБ ДЛЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ

Отражены аспекты взаимодействия параметров технологического элемента «холодная (теплая) пильгерная прокатка» при производстве труб из высоколегированных сталей для энергетического машиностроения.

Відображені аспекти взаємодії параметрів технологічного елементу «холодна (тепла) пільгерна прокатка при виробництві труб з високолегованих сталей для енергетичного машинобудування.

The aspects of interaction of parameters of the technological element “cold (warm) pilger rolling” while manufacturing tubes from high–alloy steels for energetic machine–building had been presented.

Введение

Конкурентная борьба на рынке дорогостоящих труб ответственного назначения из высоколегированных сталей требует от производителей особого подхода к реализации программ качества. Непрерывное повышение требований к качеству этих видов труб обусловлено стремлением к повышению надежности аппаратов, устройств и машин, где такие трубы используются. Наряду со специфическими требованиями к каждому виду труб, такими как высокая точность размеров, гарантированные механические и коррозионные свойства, шероховатость поверхностей, основным общим требованием является стабильность показателей качества, как минимум, в пределах партии, при минимальных отклонениях от номинальной величины каждого из показателей качества.

Это требование не может быть выполнено в полной мере при пакетной организации производства при большом количестве технологических операций, многие из которых выполняются вручную со значительным разрывом во времени. Кроме того, фактором, осложняющим выполнение этого требования, является то, что большинство сталей, из которых производятся трубы для энергетического машиностроения, считаются труднодеформируемыми.

Анализ параметров технологического элемента. Выстраивание технологических операций в линию в последовательности, предусмотренной технологией, должно обеспечить необходимые одинаковые условия обработки каждой трубы при условии обеспечения жест-

© ТЕРЕЩЕНКО А.А., ДЕХТЯРЕВ В.С., ФРОЛОВ Я.В. , 2008

кого контроля над выполнением каждой операции. Задача облегчается тем, что большинство технологических операций выполняется в одну нитку, поштучно (прокатка, очистка, правка, контроль) [1].

Решение задачи построения эффективной технологической линии производства прецизионных труб заключается в пошаговом определении оптимальных параметров каждой операции от получения заготовки до контроля качества готовых труб.

Настоящая работа посвящена определению параметров одного из основных технологических элементов поточной линии производства прецизионных труб – холодной (теплой) прокатке труб, которые в основном формируют потребительские качества готовых труб: точность геометрических размеров, механические свойства труб, разнозернистость структуры, стойкость к межкристаллитной коррозии, качество внутренней и наружной поверхности.

В настоящее время в научной литературе и производстве встречаются решения, направленные на улучшение перечисленных потребительских качеств готовых труб средствами воздействия на отдельные технологические элементы [2, 3, 4]. Однако до сих пор нет данных по комплексному влиянию параметров этих технологических элементов на конечные свойства труб и эффективность технологии в целом.

Заготовка для холодной (теплой) пильгерной прокатки при производстве труб для энергетического машиностроения может быть получена способом горячего прессования на ТПА 350 с горизонтальным гидравлическим прессом. Перед прокаткой заготовка подвергается обточке, расточке и термической обработке – отжигу с целью снятия внутренних напряжений, полученных в результате механической обработки и уменьшения среднего размера зерна.

Холодная и теплая пильгерная прокатка. При производстве труб для энергетического машиностроения применяются высоколегированные стали, которые показывают значительное снижение напряжения текучести и увеличение относительного удлинения при обработке в диапазоне начальных температур прокатки 150...250°С. Этот факт делает эффективным применение способа теплой прокатки. Основное преимущество этого способа заключаются в том, что он позволяет не только снизить силу прокатки для экономии ресурсов, но и «прощает» наличие значительных растягивающих напряжений в очаге деформации. Способ теплой прокатки реализуется на станах типа ХПТ путем нагрева трубы-заготовки индуктором непосредственно перед

 ISSN 1991-7848

задачей в зону деформации и позволяет достигать значений степени деформации металла за проход в 70…80%.

Температура нагрева металла перед прокаткой зависит от марки стали и оказывает влияние не только на свойства прокатываемого металла, но и на распределение частных деформаций по длине суммарного очага деформации (рабочего конуса). Так например, при прокатке на стане ХПТ 90 по маршруту 93×11,5→57×6,5 мм; подача – 8 мм; марка стали - 08Х18Н10Т установлено, что при уменьшении температуры подогрева заготовки с 260 до 180°С максимальная вертикальная сила прокатки увеличивается на 18% (с 563 до 664 кН). Для данного маршрута сила при холодной деформации сила прокатки составила бы 800...850 кН в зависимости от условий охлаждения рабочего конуса. Поскольку величина упругой деформации системы «клеть-валки-металл-оправка» является функцией силы прокатки, фактическое распределение обжатий по длине рабочего конуса, изменяется в зависимости от напряжения текучести деформируемого материала, которое, в свою очередь зависит от температуры подогрева заготовки. На рис. 1 представлены графики изменения частной деформации, определенной как отношения площадей поперечного сечения последующего и предыдущего сечений по длине рабочего конуса.

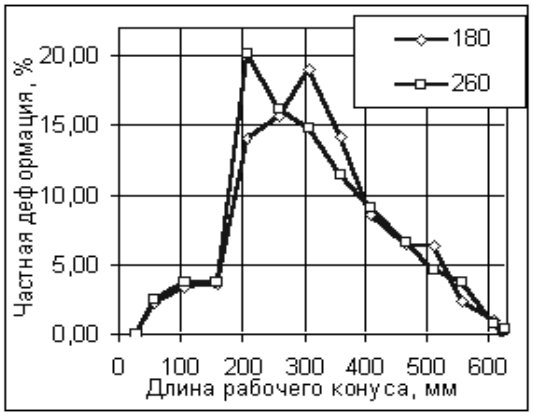


Рисунок 1 – Распределение частных деформаций по длине рабочего конуса. «180» - температура нагрева металла перед прокаткой - 180°С; «260» - температура нагрева металла перед прокаткой - 260°С

Перераспределение обжатий из-за уменьшения температуры нагрева металла приводит к тому, что на последующих участках рабочего конуса геометрические размеры инструмента вызывают дополнительную деформацию металла, недообжатого в предыдущих участках из-за увеличения зазора между валками. В связи с тем, что абсолютное значение силы прокатки по мере приближения к калибрующему участку снижается, такая дополнительная деформация не вызывает существенной упругой деформации системы «клеть-валки-металл-оправка» и позволяет получить удовлетворительные размеры поперечного сечения трубы.

Классическая холодная прокатка при производстве труб для энергетического машиностроения применяется на последних проходах для получения конечного размера труб. Степень деформации при этом ограничена силовыми условиями процесса и пластичностью металла и не превышает 35...55%. Основной задачей последних проходов прокатки является получение необходимых геометрических размеров и качества поверхности труб. Решение этой задачи требует использования эффективных технологических смазок, приспособленных к работе в очаге деформации при пильгерной прокатке. Эти смазки должны обеспечивать необходимую чистоту поверхностей, повышать износостойкость инструмента, снижать затраты энергии на прокатку, а также легко удаляться как с наружной, так и с внутренней поверхностей трубы [1, 5, 6]. Современная технологическая смазка представляет собой сложную композицию на основе продуктов минерального или синтетического происхождения (минеральное или синтетическое масло, хлорированный парафин и др.) с различными противозадирными, моющими и другими присадками. В зависимости от вида прокатываемого металла и его свойств, а также требований к качеству прокатываемых труб, СОЖ иногда можно использовать и в качестве смазки, подавая ее через стержень на оправку. Высокие степени деформации и быстроходность станов приводит к увеличению температуры металла в зоне деформации до уровня 300...500°С даже без предварительного нагрева заготовки. Таким образом, интенсивные режимы деформации при пильгерной прокатке труб на современных станах типа ХПТ не являются холодной прокаткой, даже если отсутствует предварительный нагрев заготовки перед задачей в стан. При таких режимах деформации достижение температур теплой деформации происходит за счет тепла формоизменения и трения без предварительного нагрева заготовки.

Сочетание разогрева металла, как за счет предварительного нагрева, так и за счет тепла формоизменения и трения с применением эффективных смазочно-охлаждающих жидкостей и способов их подачи, позволяет удерживать температуру рабочего конуса в узком интервале, соответствующем минимальной интенсивности упрочнения для каждого прокатываемого материала.

Удачным примером сочетания преимуществ теплой и холодной прокатки может служить маршрут прокатки труб из стали 03Х17Н14М3 для конденсаторов паровых турбин АЭС 89х8,5 – 25х0,7 мм, реализованный за 4 прохода (2 теплой прокаткой и 2 – холодной). Готовые трубы, прокатанные по этому маршруту имеют

 ISSN 1991-7848

100% стойкость к межкристаллитной коррозии, предел прочности при 20°С – 547...555 МПа, относительное удлинение – 54...55%, разнозернистость – 2 балла. Чистота поверхности по критерию составила: Ra – 0,45...0,65 для наружной и 0,15...0,35 для внутренней поверхности.

Распределение частных деформаций по длине рабочего конуса. Распределение частных деформаций по длине рабочего конуса в пределах маршрута прокатки определяется профилем ручья и оправки – калибровкой инструмента. В отечественной и зарубежной практике принято описывать закон распределения обжатий по длине рабочей части ручья аналитическими и эмпирическими зависимостями различного вида. Сегодня на производстве используются два типа калибровок инструмента – типа МИСиС с криволинейной продольной образующей гребня ручья и линейно-конусной оправкой и типа КПО – с криволинейной образующей, описываемой степенной функцией с показателем степени, одинаковым для ручья калибров и оправки. Применение калибровки типа КПО позволяет добиться высокой точности геометрических размеров труб при достаточно высокой степени деформации и производительности стана. Это обусловлено минимальной (0,003...0,005) конусностью ручья и оправки в зоне калибрования, а также отсутствием протяженной зоны редуцирования, что благоприятно влияет на ресурс пластичности прокатываемого металла. Однако изготовление и эксплуатация инструмента с использованием принципа КПО вызывает дополнительные сложности, которые в условиях производства целесообразно преодолевать при необходимости прокатки более 100 метров труб в час и степени деформации более 50% способом холодной прокатки.

Калибровка инструмента как самостоятельно, так и в совокупности с другими параметрами технологии, определяет такие качественные характеристики готовых труб как точность геометрических размеров и отсутствие на внутренней и наружных поверхностях рисок, раковин, закатов и других прокатных дефектов. Кроме того, важной задачей калибровки инструмента при прокатке труб для энергетического машиностроения является обеспечение проработанной деформационной структуры и уменьшение разнозернистости, которая является наследственным признаком горячей деформации на прессе.

Известные подходы к решению задачи определения продольной и поперечной формы калибров станов типа ХПТ подразумевают раздельное определение продольной формы ручья, имеющей в качестве образующей определенный закон изменения интенсивности обжатий

по длине рабочего конуса и поперечной, определяемой в основном требованием заполнению калибров, круглости поперечного сечения и состояния поверхности готовой трубы [7].

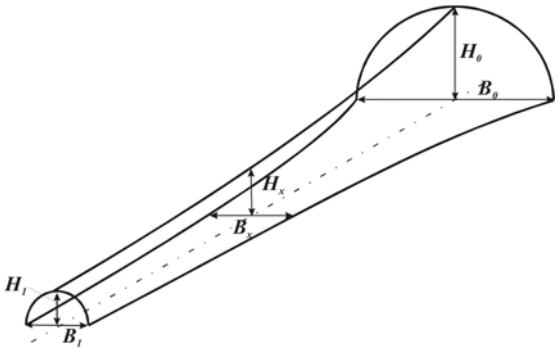


Рисунок 2 – Существующий способ проектирования поперечного профиля калибра

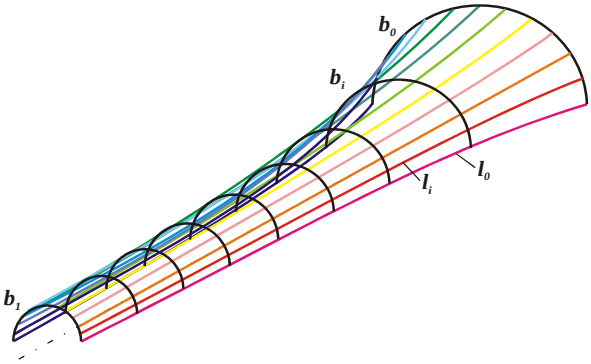


Рисунок 3 – Метод формирования рабочей части ручья калибра

Существующие методы расчета формы рабочей поверхности калибров и оправки для станов ХПТ основаны на определении формы продольных образующих ручья по максимальной глубине калибра (гребню) и по его ширине (выпускам) в контрольных сечениях (рис. 2). Т.е. поперечный профиль в каждом поперечном сечении калибра определяется лишь тремя точками и одним или несколькими углами. При этом по длине рабочей части ручья поперечный профиль остается постоянным.

Формирование профиля поперечного сечения производится исходя из:

- количества металла, приходящего в *i*-е сечение из предыдущего;
- расстояния до начала калибрующей зоны;
- отношения диаметра к толщине стенки рабочего конуса в данном сечении;
- изменения текущих механических характеристик металла в процессе деформации.

Сегодня принципиально новым подходом к проектированию формы калибра стана ХПТ является рассмотрение его как цельной поверхности – последовательности по ходу прокатки поперечных профилей (рис. 3).

Для реализации этого подхода необходимо определить координаты каждой точки рабочей поверхности. Т.к. форма калибра стана ХПТ является сложной поверхностью, образованной несколькими кривыми линиями, то описание ее единым уравнением является не-

 ISSN 1991-7848

возможным. Для решения поставленной задачи, рабочую часть калибра должна быть представлена в виде совокупности функций, составляющих эту поверхность. Конечным результатом решения совокупности функций является координатная сетка с частотой ячеек, определяемой возможностями оборудования для обработки калибра.

Такой подход в полной мере можно реализовать, только используя современные пятикоординатные станки для шлифовки калибров.

О перспективности нового подхода к формированию профиля ручья можно судить по результатам эксперимента, при котором использовались калибры с переменным по длине рабочего конуса типом поперечного профиля. В начале рабочей части ручья использовался овальный калибр, затем калибр с выпусками по радиусу и в конце – круглый калибр с выпусками по касательной. Это не является полной реализацией предложенного подхода, а только позволяет оценить важность изменения представления о принципах формирования поперечного профиля ручья калибров. Суть эксперимента заключалась в сравнении симметричной разностенности при прокатке по используемой калибровке и калибровке с переменным по длине рабочего конуса типом поперечного сечения (рис. 5). Профиль гребня ручья калибров и продольная образующая оправки в обоих случаях выполнены по принципу калибровки типа КПО.

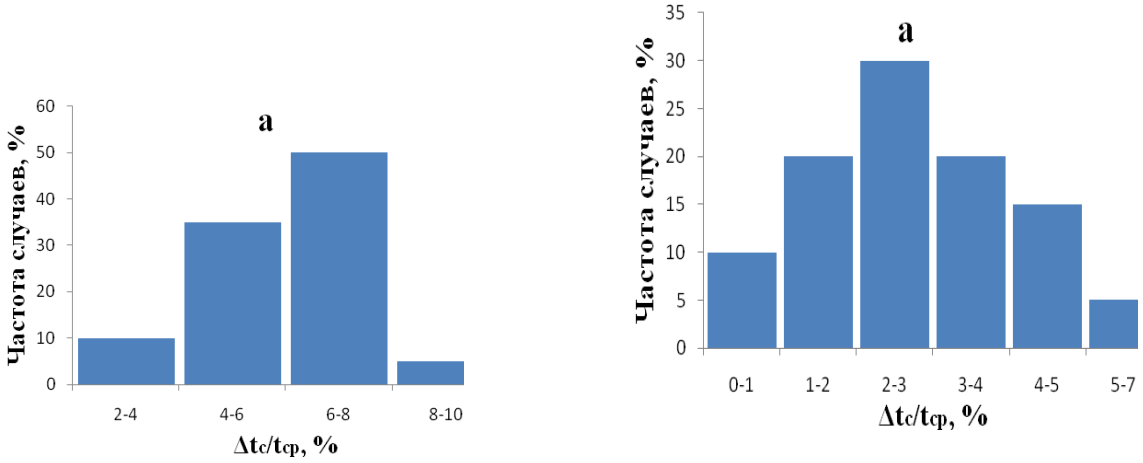


Рисунок 5 – Гистограммы распределения симметричной разностенности в партии труб, прокатанных на стане ХПТ 55: *а* – поперечный профиль по действующей калибровке; *б* – переменный тип поперечного профиля

Выводы

Для конкурентоспособного производства прецизионных труб из высоколегированных сталей необходимо применять специальные режимы деформации. Эти режимы деформации должны быть определены с учетом комплексного подхода ко всем технологическим элемен-

там. Такой комплексный подход может быть реализован в поточной линии производства труб для энергетического машиностроения. В представленной работе отражены аспекты взаимодействия параметров технологического элемента «холодная (теплая) пильгерная прокатка.

Установлено, что на распределение частных деформаций по длине рабочего конуса помимо расчетной калибровки инструмента существенное влияние оказывают прочностные свойства металла в очаге деформации, определяемые температурой подогрева перед прокаткой.

При реализации способа холодной прокатки ключевую роль в обеспечении потребительских качеств готовых труб играют характеристики технологической смазки.

Установлено, что для повышения качества труб по геометрическим размерам и уменьшения количества брака по этому параметру необходимо использовать новый подход к проектированию поперечного профиля ручья калибров, заключающийся в применении переменной по длине рабочего конуса формы поперечного сечения ручья калибров при сохранении принципов калибровки типа КПО.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фролов В.Ф., Данченко В.Н., Фролов Я.В. Холодная пильгерная прокатка труб. – 2005.
2. Пат. №26279U Україна, бюл. № 14 МПК B21C 23/00. Спосіб виготовлення безшовних труб з мартенситно-феритної сталі / Терещенко А.А., Куценко М.О., Чекмарьов В.В., Винокуров М.В., Ковбаса І.Г. та інш.
3. Терещенко А.А., Кекух С.Н., Головченко А.П.. Усовершенствование способа прокатки на станах ХПТ с подачей и поворотом в обоих крайних положениях клети. // Металлургическая и горнорудная промышленность – 2007. – № 4. – С. 57-59.
4. Х.-Й Браун, А. Терещенко, Дж. Лейн. Высокочастотная правка бесшовных труб из нержавеющей стали // Трубы-Украина – 2007. Сб. конф. ІТА – 2007. – С. 300-304.
5. Новая технология производства коррозионностойких труб высокого качества / Н.В. Винокуров, А.А. Терещенко, В.Д. Носарь, Л.В. Гречаник, Н.А. Чумакова// Сучасні проблеми металургії. Наукові вісті. Том 8. Пластична деформація металів. – Дніпропетровськ: Системні технології, 2005. – С. 453-455.
6. Пат. №30300U Україна, бюл. № 16 МПК C10M 135/00. Мастило технологічне для обробки металів тиском. / Терещенко А.А., Куценко М.О., Лютик В.Я., Овчаренко В.Г., Жук В.М. та інш.
7. Дехтярьов В.С., Фролов Я.В. Новый метод построения поперечного профиля рабочей части ручья калибров станов ХПТ // Теорія і практика металургії. – 2006. – №12. – С. 25-30.

 ISSN 1991-7848

УДК 621.774.35

Ханін М.І., Чередниченко І.П., Алексєєв А.В.

ВИЗНАЧЕННЯ ПОТОЧНИХ ЛІНІЙНИХ ЗМІЩЕНЬ І ЧАСТКОВИХ ОБТИСКІВ ПРИ ПІЛІГРИМОВІЙ ПРОКАТЦІ ТРУБ, ВИХОДЯЧИ З ІСТИННИХ ЗНАЧЕНЬ ОБ'ЄМІВ ПОДАЧІ

Запропонована уточнена методика розрахунку часткових обтисків по довжині робочого конуса і дрібності деформації в пілігримових процесах, що базується на визначенні поточних лінійних зміщень, виходячи з істинних значень об'ємів подачі.

Предложена уточненная методика расчета частных обжатий по длине рабочего конуса и дробности деформации в пилигримовых процессах, базирующаяся на определении текущих линейных смещений, исходя из истинных значений объемов подачи.

The specified method of calculation of the private reduction out is offered on length of working cone and shot of deformation in rotary forge processes, being based on determination of current linear displacements, coming from the truth values of volumes of serve

Вступ

Пілігримові процеси в станах гарячої і холодної прокатки характеризуються змінною величиною обтисків діаметра і товщини стінки по довжині робочого конуса (сумарної зони деформації). Розподіл часткових обтисків по довжині конуса визначається, в першому наближенні, калібровкой технологічного інструменту. Вказаний розподіл, у свою чергу, впливає на зміну силових параметрів і пружню деформацію робочої кліті, що в сумі визначає остаточну закономірність розподілу обтисків по довжині конуса.

У будь-якому випадку необхідним є рішення задачі точного визначення часткових обтисків в довільному перетині зони деформації по заданій калібровці валків. Це дозволяє вибирати оптимальні параметри калібровки і створювати раціональний розподіл силових параметрів.

Проблема. На важливості точного рішення даної задачі акцентував увагу П.Т. Ємельяненко. У роботі [1] він показав помилковість рішення Г. Лобковитца (рис. 1, а), згідно якому обтиск по стінці в довільному перетині x дорівнює різниці товщини стінок у вказаному і попередньому перетині, віддаленому від перетину x на величину подачі m. Таке рішення, що не враховує подовжнє зміщення металу, продеформованого до підходу валків в перетин x, дає явно занижені результати.

© ХАНІН М.І., ЧЕРЕДНИЧЕНКО І.П., АЛЕКСЄЄВ А.В., 2008.

Правильно враховуючи механізми протікання деформації металу, П.Т. Ємельяненко [1, 2] сформулював наступне правило: «Величина обтиску в періодичній частині профілю пілігримової головки дорівнює

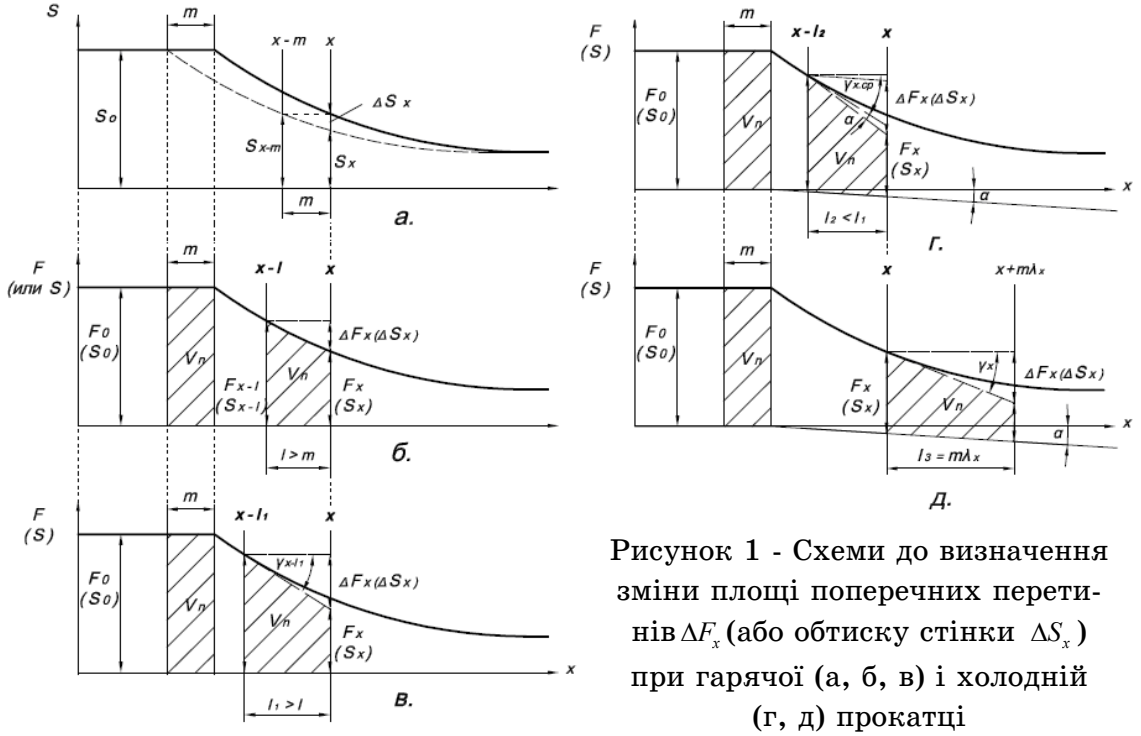


Рисунок 1 - Схеми до визначення зміни площі поперечних перетинів ΔF_x (або обтиску стінки ΔS_x) при гарячої (а, б, в) і холодній (г, д) прокатці

різниці між висотою даного перетину і висотою перетину, віддаленого від першого на такій відстані, при якій об'єм, що розміщується між цими перетинами, рівний об'єму подачі металу».

Графічне представлення приведеного принципу показане на рис. 1, б.

Об'єм подачі V_n рівний

$$V_n = F_0 m, \tag{1}$$

де $F_0(F_з)$ - площа поперечного перетину заготовки;

m - величина подачі заготовки перед одним циклом пілігримової прокатки.

На робочому конусі перед даним перетином об'єм подачі визначається як

$$V_n = \int_{x-l}^{x} F_x dx, \tag{2}$$

 ISSN 1991-7848

де F_x – площа довільного поперечного перетину x, зміна якого по осі x визначається калібровкою валку і кінематикою процесу;

l– відстань від перетину x до попереднього перетину, між якими розміщується об'єм подачі V_n (лінійне зміщення перед перетином x).

Для вирішення поставленої задачі - визначення часткових обтисків в перетині x, рівного

$$\Delta S_x = S_{x-l} - S_x , \qquad 3)$$

необхідно обчислити інтеграл (2). Аналітичне рішення у зв'язку з великою складністю залежності $F_x(x)$ складно (або неможливо).

Через це П.Т. Ємельяненко запропонував приблизне рішення [2], засноване на заміні складної функції $F_x(x)$ лінійною. Як видно з рис. 1, в, заміна складної фігури подовжнього перетину робочого конуса трапецією приводить до отримання $l_1 > l$ і підвищення величини розрахункового обтиску в порівнянні з істинним.

Аналіз досліджень. Для умов холодної прокатки Ю.Ф. Шевакіним [3] запропонована схема, яка декілька відрізняється від схеми П.Т. Ємельяненка (див. рис. 1, г), хоча, вона також базується на кусочно-лінійному представленні профілю робочого конуса і що, отже, також дає наближене рішення. Згідно цій схемі

$$\Delta S_x = l_2\left(tg\gamma_{x.cp} - tg\alpha\right), \qquad (4)$$

де $tg\gamma_{x.cp}$ - середня конусність рівчака валка на даній ділянці $(x - l_2) - x$;

$tg\alpha$ - конусність оправки.

Враховуючи невизначеність величини $\gamma_{x.cp}$ М.Б. Роговим [4] і П.К. Тетеріним [5] запропонована спрощена формула (див. рис. 1, д):

$$\Delta S_x = l_3\left(tg\gamma_x - tg\alpha\right) = m\lambda_x\left(tg\gamma_x - tg\alpha\right), \qquad (5)$$

де $tg\gamma_x$ - конусність рівчака в перетині x;

$$\lambda_x = \frac{F_0}{F_x} = \frac{S_з\left(D_з - S_з\right)}{S_x\left(D_x - S_x\right)}$$ – коефіцієнт витяжки в перетині x.

Для визначення закономірності зміни ΔS_x по довжині зони обтиску стінки l_0 робочого конуса Ю.Ф. Шевакіним [2, 6] запропонована методика (див. рис. 2), що полягає у виконанні наступних операцій: розбивка довжини зони l_0 на ряд рівновіддалених один від одного контрольних перетинів (який-небудь зв'язок відстаней між цими пе-

ретинами і об'ємом подачі не передбачається); розрахунок коефіцієнтів витяжки, товщини стінки, конусностей рівчака γ_i і обтиску по товщині стінки ΔS_i в контрольних перетинах у відповідності з аналітичним виразом витяжки або профілю гребеня рівчака калібру. Обтиск визначається приблизно, аналогічно формулі (5):

$$\Delta S_i = m\lambda_{Si}\left(tg\gamma_i - tg\alpha\right). \qquad (6)$$

Правило П.Т. Ємельяненка в розрахунку безпосередньо не використовується.

Дрібність деформації запропоновано визначати як

$$n_\partial = \frac{l_0}{m\lambda_{cp}} \approx \frac{l_0}{m\dfrac{1+2\lambda_\Sigma}{3}}, \qquad (7)$$

де λ_Σ - сумарний коефіцієнт витяжки.

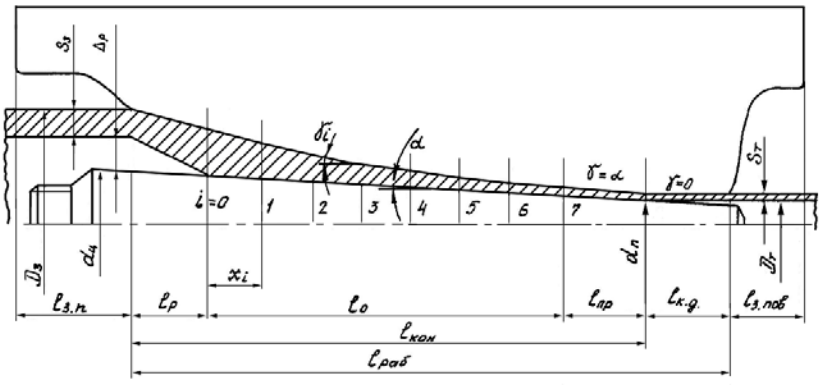


Рисунок 2 - Розбивка зони обтиску стінки

Постановка задачі. У даній роботі запропонована нова методика розрахунку обтисків стінки по довжині робочого конуса і дрібності деформації, що безпосередньо базується на використанні правила П.Т. Ємельяненка. Оскільки точне рішення, пов'язане з аналітичним розкриттям інтеграла (2), зустрічає значні математичні утруднення, пропонована методика заснована на чисельному інтегруванні, виконаному за допомогою ПК. Дрібність деформації визначається в ході рішення як число об'ємів подачі, що укладаються в об'ємі робочого конуса.

Результати досліджень. Схема до визначення параметрів показана на рис. 3.

Граничні перетини $k=0; k=1$ і т.д. відокремлюють об'єми подачі V_n на робочому конусі. Об'єм подачі визначається підсумовуванням елементарних об'ємів, де Δx - елементарний крок інтегрування; F_i –

 ISSN 1991-7848

площа поперечного перетину робочого конуса, визначувана на кожному кроці Δx відповідно до параметрів калібровки (математичними виразами профілю рівчака валка і оправки).

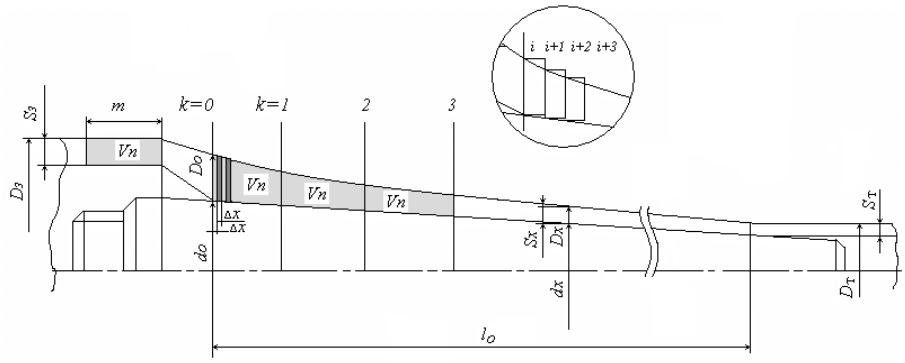


Рисунок 3 - Зміна параметрів деформації по довжині робочого конуса

Підсумовування елементарних об'ємів $\sum_{i=0}^{i=l_0/\Delta x} \Delta V_i$ ведеться по всій довжині зони l_0 з виділенням граничних перетинів k_i, що відокремлюють об'єми подачі, в яких $i = i_k$.

Значення i_k і відповідно перетини k_i знаходяться за допомогою логічного блоку, в який введена умова

$$\sum_{i=0}^{i_k} \Delta V_i \le kV_n, \tag{8}$$

де $k = 1,2,3...$; координати цих перетинів $x_k = i_k \Delta x$.

З приведеної умови (8) видно, що точність розрахунку залежить від величини кроку інтегрування Δx. Для перевірки впливу Δx виконали розрахунки розподілу обтисків стінки по довжині робочого конуса для маршруту прокатки $57\text{x}4.5 \rightarrow 38\text{x}1.8$ мм на стані ХПТ-55 при подачі $m = 6$ мм, конусності оправки $2tg\alpha = 0.023$. Калібровка гребеню рівчака розрахована виходячи із закону розподілу стінки по довжині зони обтиску l_0,, запропонованого Ю.Ф. Шевакіним [6]:

$$S_x = \frac{S_0}{\dfrac{\lambda_s - 1}{1 - e^{-0.64}}\left(1 - e^{-0.64\frac{x}{l_0}}\right) + 1}. \tag{9}$$

Крок інтегрування Δx варіювали в межах 0,1–0,5 мм. Результати розрахунку показали, що збільшення Δx призводить до порушень плавності ходу кривої зміни ΔS_i по довжині обтискової зони.

Для вказаного вище маршруту холодної прокатки і калібровки інструменту виконані порівняльні розрахунки розподілу обтисків стінки по довжині зони обтиску по двох методиках:

- широко використовуваній в даний час методиці Ю.Ф. Шевакіна, що базується на розрахунку параметрів в контрольних перетинах, відстані між якими не пов'язані з об'ємом подачі;

- запропонованій методиці, заснованій на правилі П.Т. Ємельяненка, що полягає у визначенні обтисків по різниці стінок в двох граничних перетинах (попередньому і подальшому), між якими розміщується об'єм подачі, і визначенні об'єму подачі шляхом чисельного інтегрування (при $\Delta x = 0{,}1$ мм).

Результати розрахунку приведені на рис. 4. Вони показують, що в основному відмінність розрахункових обтисків спостерігається на початку робочого конуса, де воно досягає 25%. Число точок на кривій 1 відповідає числу циклів (дрібності) деформації на довжині зони обтиску стінки. Для даного прикладу отримали: по методиці Ю.Ф. Шевакіна $n_\partial = 22$, по запропонованій методиці $n_\partial = i_{k\Sigma} = 30$, тобто більше на 36%.

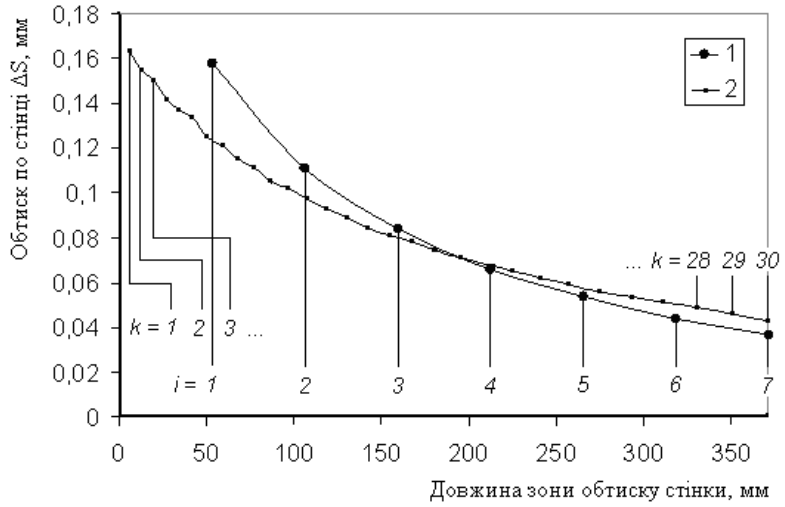


Рисунок 4 - Розподіл обтисків стінки ΔS_i по довжині робочого конуса, розраховане по методиці Ю.Ф. Шевакіна (1) і пропонованій методиці (2)

Запропонована методика може бути використана при уточненому розрахунку режимів деформації і енергосилових параметрів в станах пілігримової прокатки.

 ISSN 1991-7848

Висновки

Розроблена нова методика розрахунку обтисків по товщині стінки труби в довільних перетинах, розподіли обтисків по довжині робочого конуса, а також дрібність деформації в станах пілігримової прокатки, теоретичною базою якої є правило П.Т. Ємельяненка. Використання цього правила забезпечує вищу точність визначення параметрів в порівнянні з відомими методиками.

ЛІТЕРАТУРА

1. Емельяненко П.Т. Истинные значения обжатий в пильгерных процессах. - Теория и практика металлургии, 1940. №3.
2. Емельяненко П.Т. Теория косой и пилигримовой прокатки. – М.: Металлургиздат, 1949. – 492с
3. Шевакин Ю.Ф. Калибровка и усилия при холодной прокатке труб. – М.: Металлургиздат, 1963. – 272с.
4. Рогов М.Б. Теоретические и экспериментальные вопросы холодной прокатки труб из нержавеющей стали марки 1Х18Н9Т: Автореф. Дис. ... канд.техн.наук. – Днепропетровск, 1951.
5. Тетерин П.К. Рациональная калибровка валков станов холодной прокатки труб. – Сталь, 1953, №13.
6. Шевакин Ю.Ф., Глейберг А.З. Производство труб: Учебник для вузов. – М.: Металлургия, 1968. – 440с.