

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 400HB без термозміцнюючої обробки.

Исследованы стали с бейнитной структурой после горячей деформации и отпуски. Показаны возможности получения железнодорожных колес с бейнитной структурой и твердостью 400HB 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 требуют существенных мероприятий по обеспечению повышенного уровня твердости ободьев до 400HB. 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 330HB 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 HB) требует получения железнодорожных колес с соответствующей твердостью, что обеспечит соотношение твердости колесо/рельс (0,8-1,0)/1,0 [4], а также необходимый

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 400HB, 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 элементов: 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 950-900⁰C, степени деформации 50 и 90% (это степени деформации соответственно обода и диска при производстве колеса), охлаждение на воздухе (скорость охлаждения 1,5-5⁰C/с в зависимости от времени года). После горячей деформации часть образцов отпускали при температуре 500-525⁰C 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 400HB 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»	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5 , %	ψ , %	НВ	КСУ, 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 $(\text{Fe}, \text{Cr})_3\text{C}$), 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.

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 $(\text{Fe}, \text{Cr})_3\text{C}$, хотя встречаются участки бейнита и без карбидов. Гладкие участки на репликах соответствуют мартенситу (рис. 1, в, г), который является мелкоигльчатым 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 $10^{11}\text{--}10^{12} \text{ см}^{-2}$, 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).

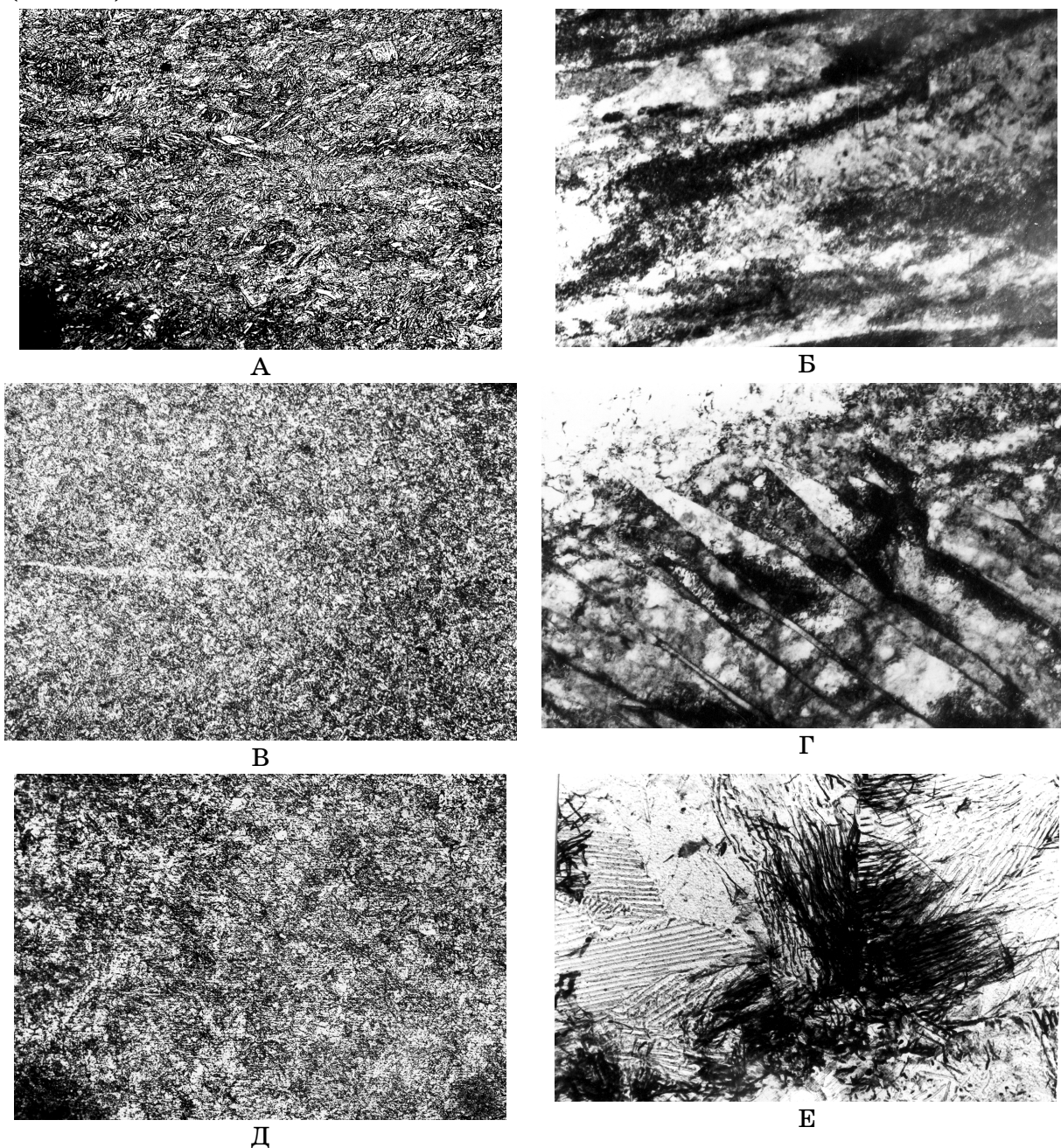


Рисунок 1 - Структура горячедеформированных сталей пл.1 (а,б), пл.4 (в,г) и пл.6 (д,е): а,в,д - х 200, б,г - х22000, е - х12000

Таблица 2

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

Режим обработки	пл. 1			пл. 3			пл. 4		
	$D_{HKL} \cdot 10^{-4}$ см	$\Delta a/a \cdot 10^{-3}$	$\rho_{\perp}$, см ⁻²	$D_{HKL} \cdot 10^{-4}$ см	$\Delta a/a \cdot 10^{-3}$	$\rho_{\perp}$, см ⁻²	$D_{HKL} \cdot 10^{-4}$ см	$\Delta a/a \cdot 10^{-3}$	$\rho_{\perp}$, см ⁻²
Горячая деформация ($\varepsilon = 50\%$)	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 ($\varepsilon = 50\%$) + 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 плавов 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 плавов 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 плавов 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 плавов 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 наплавов 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 (500-525⁰С, 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

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	σ_B , МПа	σ_T , 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

Характеристика 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

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°C). 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 плавов 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 плавов 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 плавов 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.N. 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.

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 чугуна. 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 металі 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

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 фаз 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 окислительную стойкость, 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.

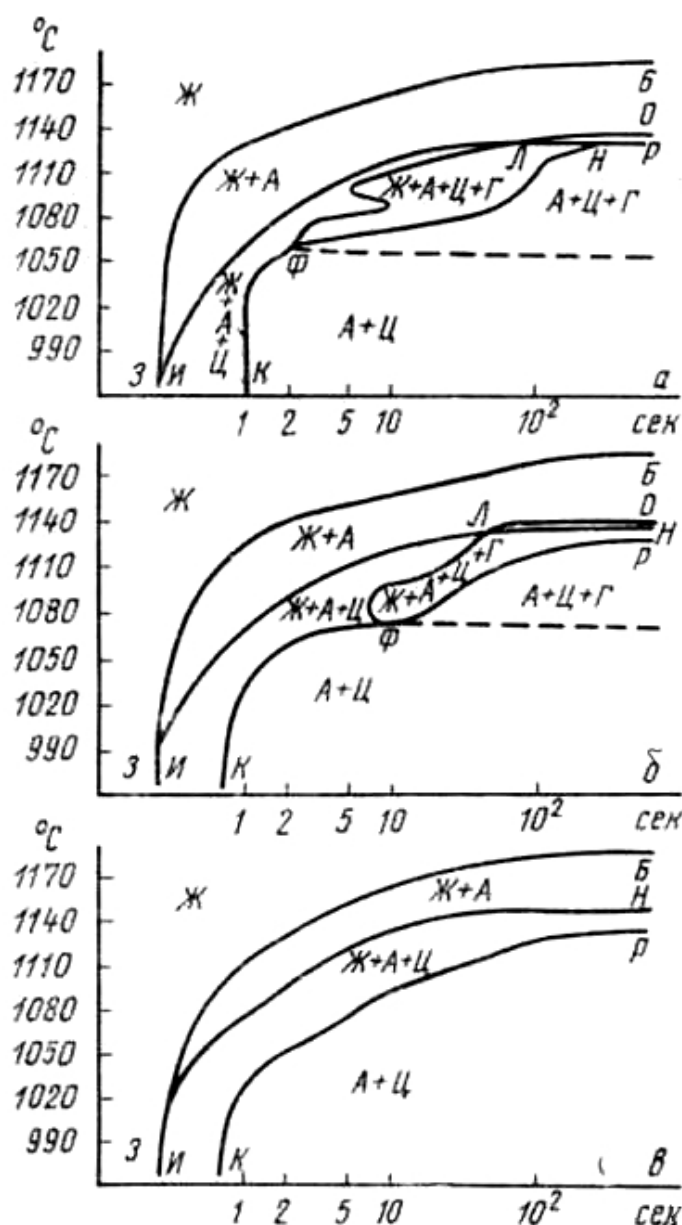


Рисунок 1 - Влияние содержания хрома на кинетику кристаллизации чугуна:

- 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): С 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 40-60⁰С – это процессы удаления влаги и адсорбированных газов.

В чугунах с 0,2% хрома при температуре 280⁰С начинается процесс газонасыщения, а при содержании 0,48% хрома температура начала газонасыщения 285⁰С. Таким образом наблюдается последовательное повышение температуры начала газопоглощения (рис.3):

280⁰C → 285⁰C → 310⁰C → 330⁰C → 510⁰C
 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 510⁰C. Следовательно, жаростойкость чугунов существенно возрастает при увеличении концентрации хрома (примерно в 1,8 раза).

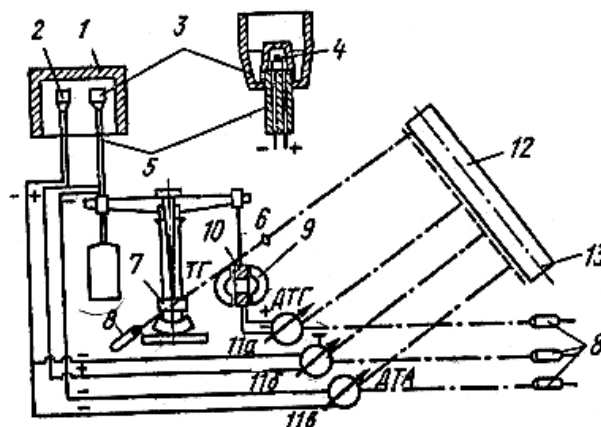


Рисунок 2 - Принципиальная схема дериватографа [6]

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

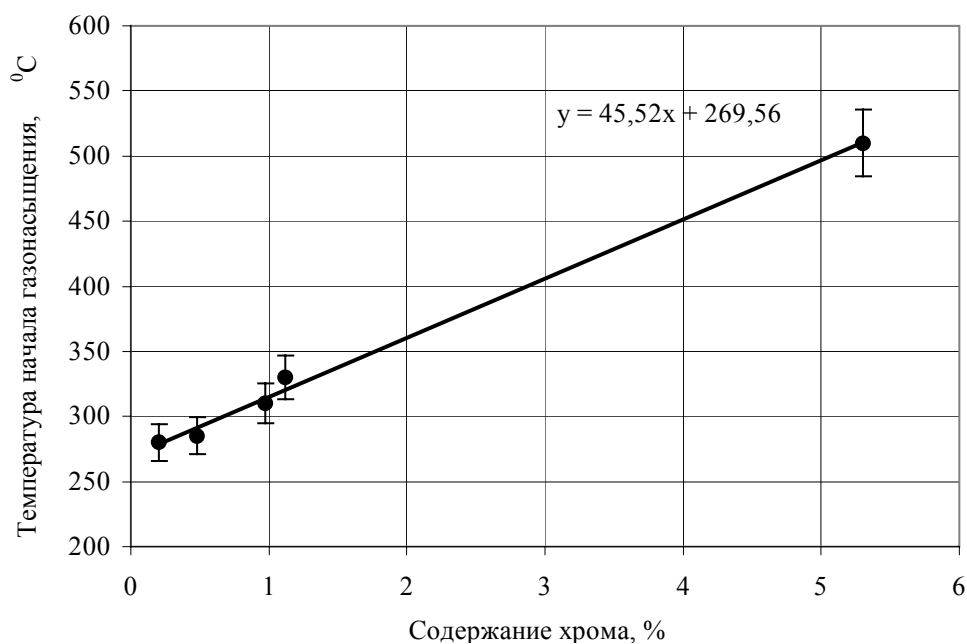


Рисунок 3 - Влияние содержания хрома на газонасыщение чугунов

Таблица 1

Изменение коэффициента диффузии водорода в зависимости от температуры

$t^0, ^\circ\text{C}$	20	100	200	300	400	500	600	700	800
$D \times 10^5 \text{ см}^2/\text{с}$	1,5	3,5	6,7	10,0	13,8	17,0	20,4	23,4	26,9

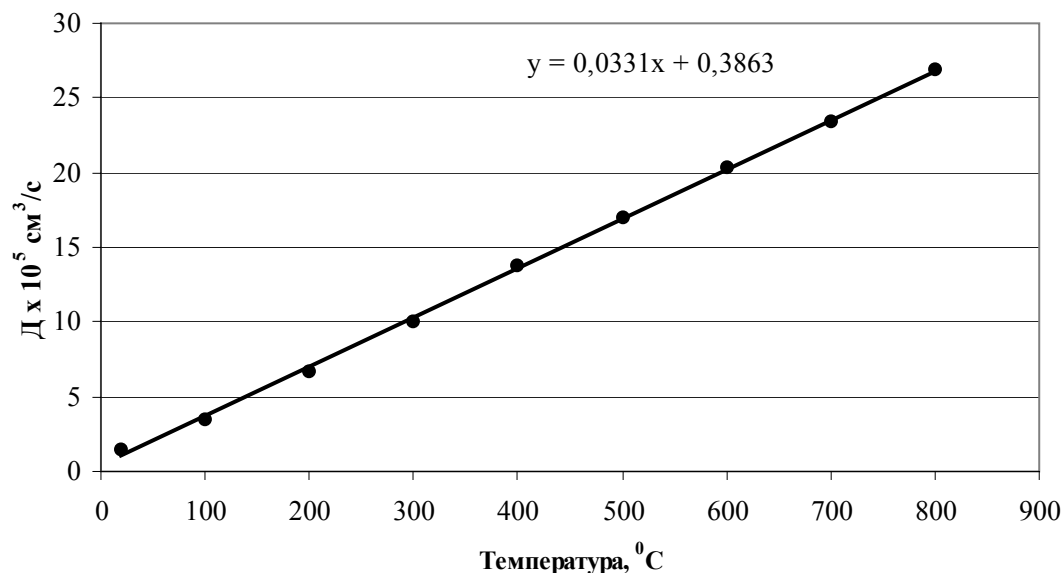


Рисунок 4 - Изменение коэффициентов диффузии водорода в α -Fe при повышении температур от 20 до 800 ^0C и нормальном давлении

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 ^0C 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 чугуна хрома следующим образом (рис.5):

750 ^0C $\rightarrow$ 770 ^0C $\rightarrow$ 780 ^0C $\rightarrow$ 850 ^0C $\rightarrow$ 880 ^0C
 0,2% Cr 0,48% Cr 0,97% Cr 1,17% Cr 5,3% Cr.

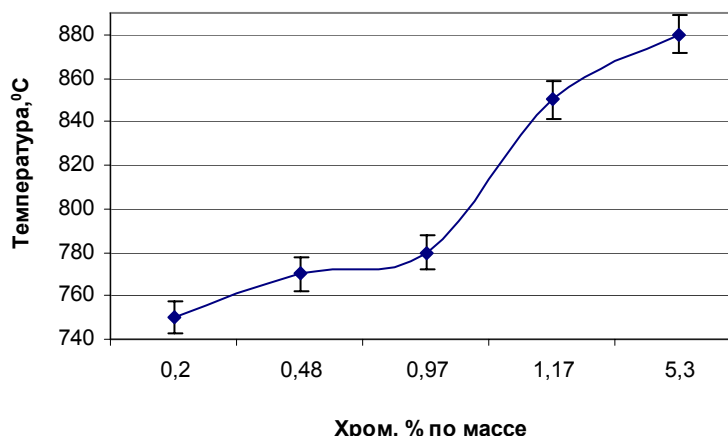


Рисунок 5 - Влияние хрома на процесс образования окисной пленки

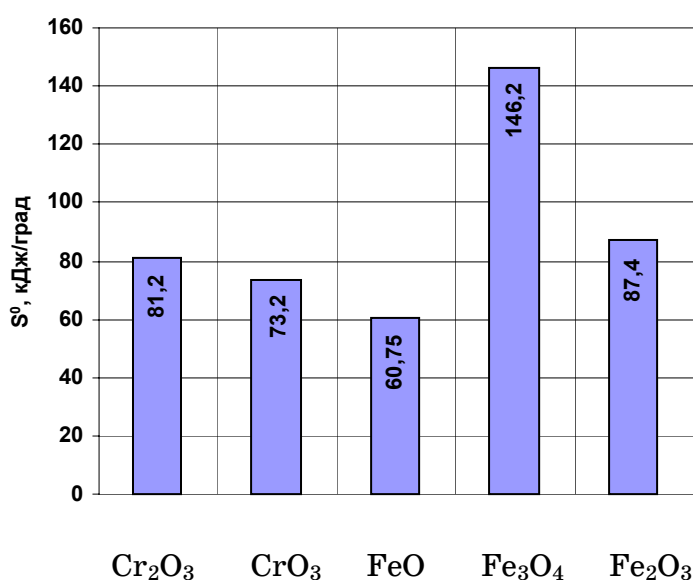
При небольшом количестве хром не участвует в образовании защитных окисных плен в чугунах. Структура окалина при содержании хрома в чугунах 0,2 - 1,17 %, так же как и в сером чугунах, является трехслойной и состоит из окислов железа. Это FeO (закись железа), которая образуется в случае окисления железа на воздухе при 700 и 800⁰; 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 окислении на воздухе при температурах 600-900⁰C. Однако во всех случаях под наружной тонкой пленкой Fe_2O_3 образуются 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 вследствие 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.

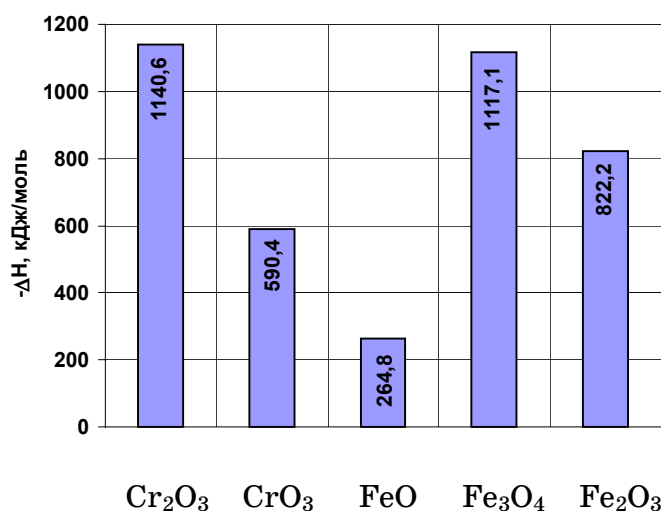
Исключением является оксид Cr_2O_3 , который практически бездефектен, и поэтому обладает хорошими защитными свойствами. При содержании в сплаве 5,3% хрома это устойчивое соединение образуется в опытном чугунах, если исходить из термодинамических данных (рис.6) Cr_2O_3 имеет высокую энтальпию (- ΔH 1140,6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

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 $\text{П} (\text{Ф} + \text{Ц}) \rightarrow \text{А}$ 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 $\text{А} \rightarrow \text{Ф} + \text{Г}$. 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.

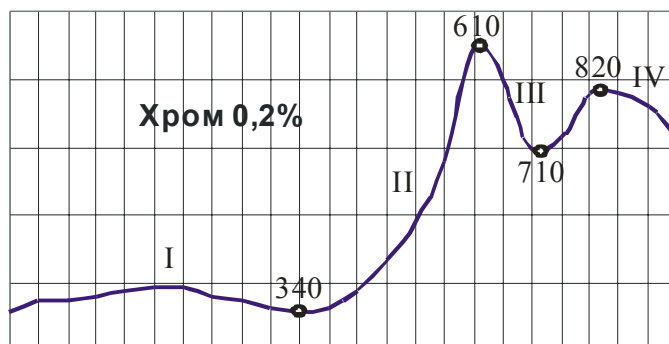
Могут также развиваться процессы выравнивания химического состава аустенита.

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

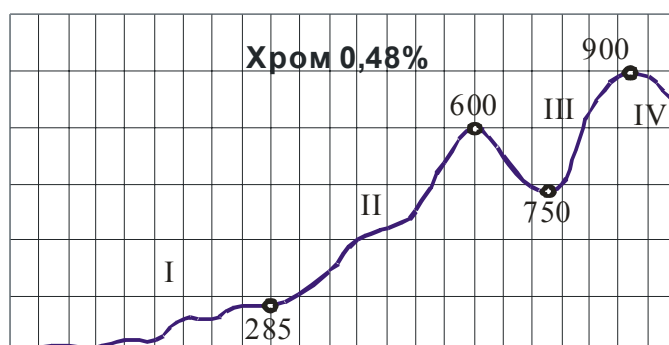
$610^{\circ}\text{C} \rightarrow 600^{\circ}\text{C} \rightarrow 590^{\circ}\text{C} \rightarrow 600^{\circ}\text{C} \rightarrow 640^{\circ}\text{C}$

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

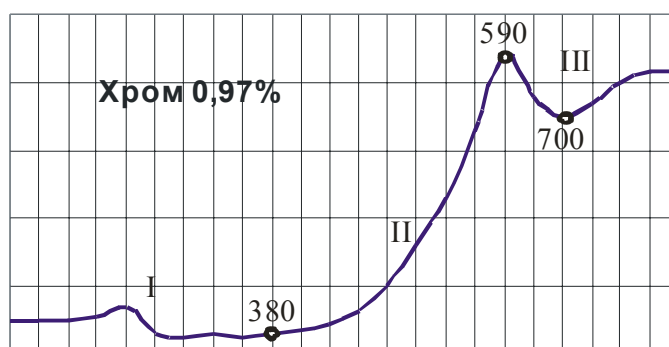
Из приведенных данных следует, что достаточно чугуны легировать 1,17% хрома, чтобы обеспечить его высокую жаропрочность, наряду с жаростойкостью.



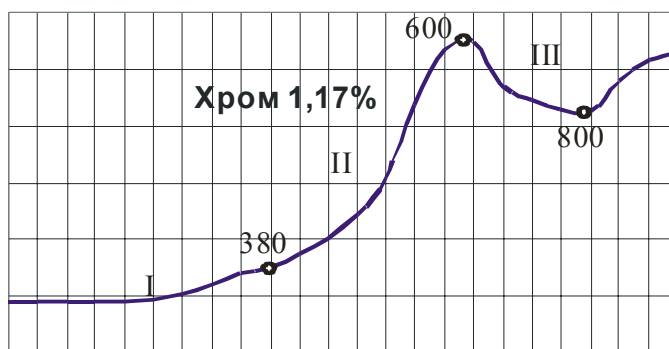
а)



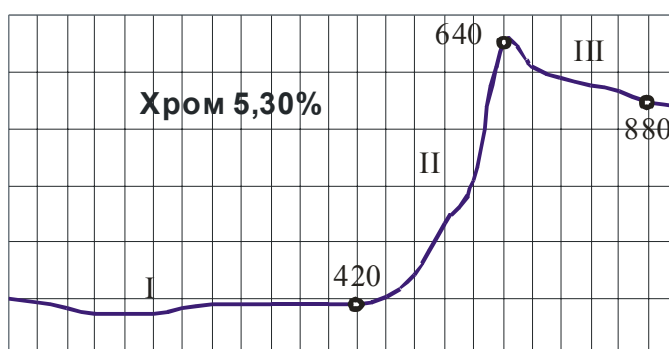
б)



в)



г)



д)

Рисунок 7 - Кривые ДТА металла опытных плавов

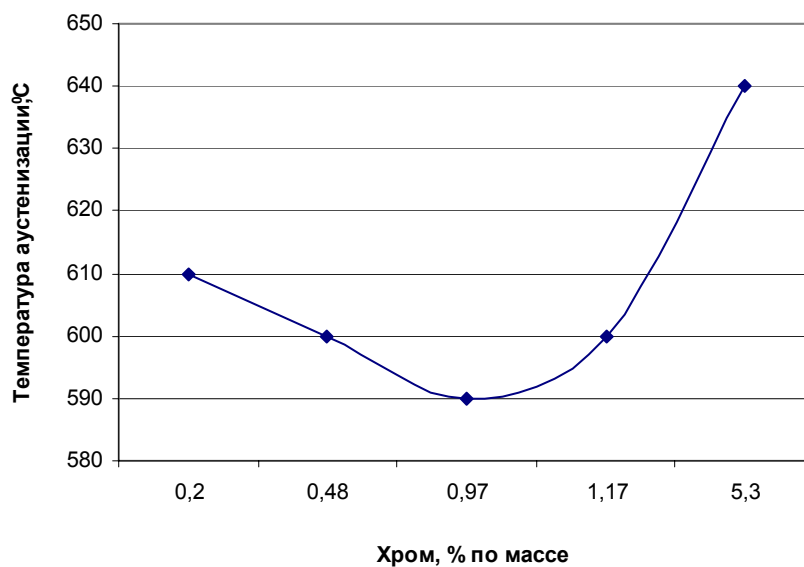


Рисунок 8 – Влияние хрома на температуру начала образования аустенита

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.: Metallurgy, 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.: Metallurgy, 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.: Metallurgy, 1983. 352 с.
7. Гельд П.В., Рябов Р.П. Водород в металлах и сплавах. М., Metallurgy, 1974, с.134.
8. Фромм Е., Гебхард Е. Газы и углерод в металлах. М.: Metallurgy, 1980, 711 с.
9. Новиков И.И. Теория термической обработки металлов. М.: Metallurgy, 1986, 480 с.

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 пирозэффектом 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 отдельную обработку расплава чугуна для рабочего слоя валка (70...80% металла от общей массы

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 чугунах 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 пластинчатую. Было установлено, что полное подавление выделения сотового ледебурита в белом чугунах 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 чугунах 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 чугунах 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 перлитно-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

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 переделный и литейный чугуны, стальной лом. Масса выплавленного металла была 32 т. При достижении расплавом температуры 1683 К 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 перлитно-графитную структуру с небольшими количествами феррита и цементита. В опытном валке перлит на всех исследованных расстояниях от

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 $\sigma_{\text{в}}^{\text{изг}}$ и $\sigma_{\text{в}}^{\text{р}}$ опытного валка были на 15...25% выше, чем у валка текущего производства (рис. 1 и 2). С удалением от поверхности пределы прочности $\sigma_{\text{в}}^{\text{изг}}$ и $\sigma_{\text{в}}^{\text{р}}$ 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).

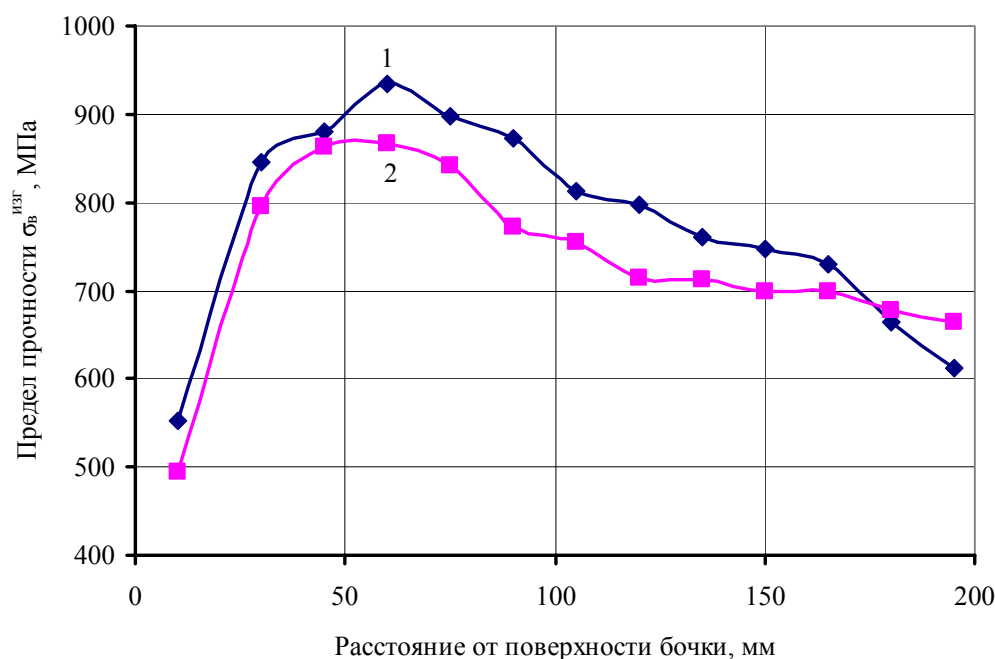


Рисунок 1 - Изменение прочности при изгибе по толщине бочек валков: опытного (1) и серийного производства (2)

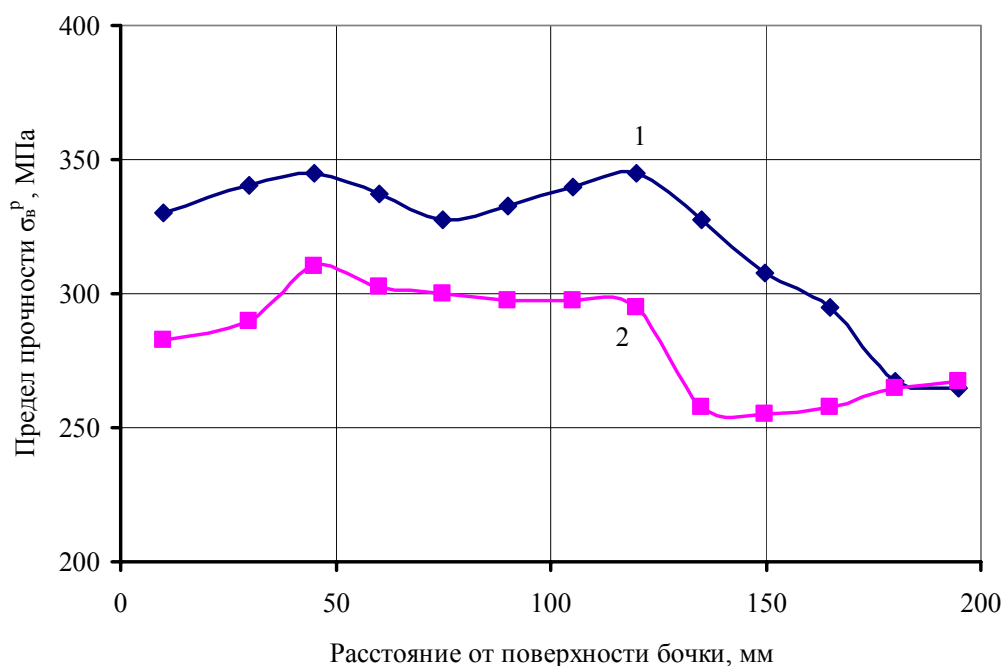


Рисунок 2 - Изменение временного сопротивления по толщине бочек валков: опытного (1) и серийного производства (2)

Таблица 1

Продолжительность затвердевания рабочего слоя отливок валков

Диаметр вала 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. %				
	Σ PЗМ	Mg	Si	Al	Fe
ФС30PЗМ30 (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	PЗМ _{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	$\frac{0,97}{2,28}$	0,56	0,12	0,01	$\frac{0,41}{0,20}$	$\frac{-}{0,020}$	ост.	1673	1613
5	3,10	$\frac{0,99}{1,65}$	0,52	0,12	0,01	$\frac{0,14}{0,07}$	$\frac{-}{0,010}$	ост.	1683	1623
6	3,10	$\frac{0,99}{1,95}$	0,55	0,11	0,01	-	0,04	ост.	1743	1613
7	3,12	$\frac{1,05}{1,98}$	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

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 пластинчатого типа и перлитно-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 ФСЗОРЗМЗ0 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. Бела́й 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 ; Оpubл.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; Оpubл. 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.

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

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

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.

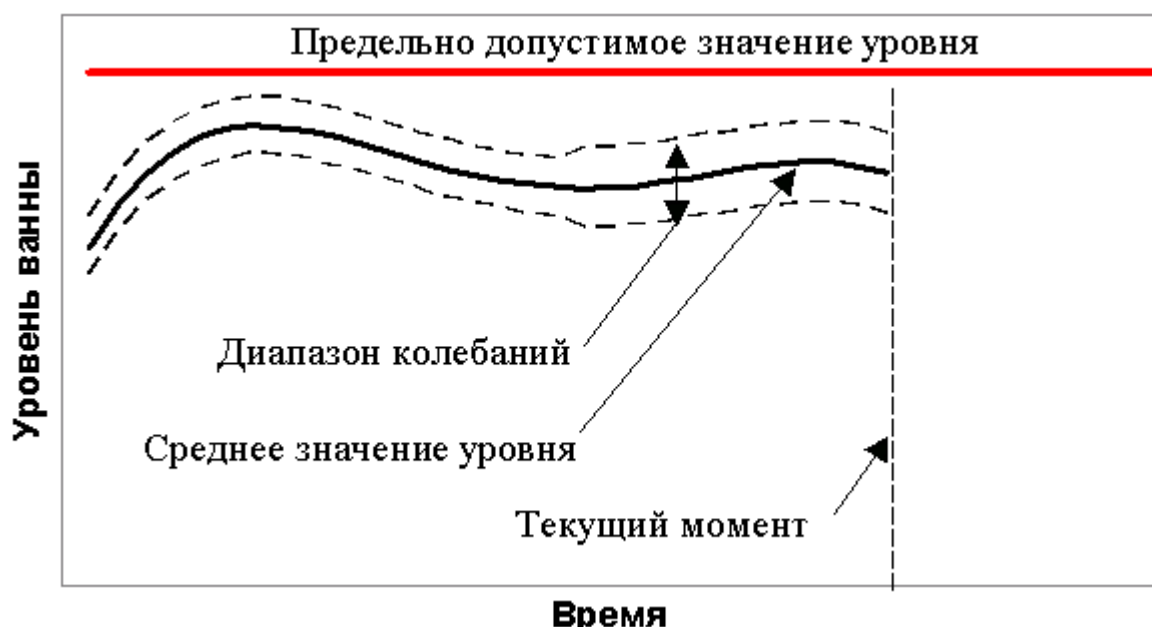


Рисунок – График изменения во времени среднего значения уровня с наложенным диапазоном колебаний

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

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. Головкин, 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. Головки, 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 материалоемкости 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., ГОЛОВКИ В.И., КУКУШКИН О.Н., МИХАЙЛОВСКИЙ Н.В., 2006

Поэтому особый интерес представляют работы по созданию и внедрению сенсорных систем на основе нетрадиционных для металлургии принципов технического зрения и осязания (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, обогащательной, 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 $1,7...2,0 \text{ т/м}^3$, для кокса $0,36...0,53 \text{ т/м}^3$, известняка – $1,6...2,0 \text{ т/м}^3$.

Попытки создания профиломеров 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 $\pm 0,5$ м.

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

однозначно судить о положительных результатах измерения профиля поверхности шихты. По данным ЦНИИЧерМета им. И.П. Бардина, недостатками таких систем являются аппаратная 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 наличия 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

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 $\pm 0,1$ м, а профиля поверхности $\pm 0,2$ 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

отсутствуют какие-либо возмущения, а сам резервуар полностью свободен от каких-либо внутренних конструктивных элементов. Однако реальные условия сильно отличаются от идеальных и приносят 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 источника 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/м³ 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.

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, транспортирование 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 дозирования 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. Головки // 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. 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. Головки, Н.В. Михайловский и др. / Современные проблемы металлургии. Научные труды ГМетАу. – Вып. 1. – Днепропетровск. 1999. – С. 279-296.

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 здрибнювання з вапняком. Дослідження виконане з використанням методу математичного планування експерименту Боксу - Бенкіна (трехфакторний 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

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, отсеков 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 ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O 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 А = 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.

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 однокальцевого феррита, а также при соотношениях $\text{CaO} : \text{Fe}_2\text{O}_3$ (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 ($m_{\text{воды}} \approx 200\text{г}$). 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 теплотерь 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 $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO}$ (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 нулевой нижний	35	6	10
	30	4	5
	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.

$$\begin{aligned} \text{УП} = & 0,933 + 0,05463(x_1 - 30)/5 - 0,011625(x_2 - 4)/2 - 0,1687(x_3 - 5)/5 + \\ & + 0,03275(x_1 - 30)/5 * (x_2 - 4)/2 + 0,03550(x_1 - 30)/5 * (x_3 - 5)/5 - 0,10300(x_2 - 4)/2 * (x_3 - 5)/5 - \\ & - 0,10038[(x_1 - 30)/5]^2 - 0,11986[(x_2 - 4)/2]^2 - 0,27163[(x_3 - 5)/5]^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ИНУ} = & 92 + 0,625 * (x_1 - 30)/5 + 1,813 * (x_2 - 4)/2 - 0,438 * (x_3 - 5)/5 - \\ & - 2,5 * (x_1 - 30)/5 * (x_2 - 4)/2 - 0,75 * (x_1 - 30)/5 * (x_3 - 5)/5 - 4,625 * (x_2 - 4)/2 * (x_3 - 5)/5 - \\ & - 1,1875 * [(x_1 - 30)/5]^2 - 1,8125 * [(x_2 - 4)/2]^2 - 3,0625 * [(x_3 - 5)/5]^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ИНИ} = & 2 + 0,125 * (x_1 - 30)/5 - 0,0625 * (x_2 - 4)/2 + 1,0625 * (x_3 - 5)/5 + \\ & + 0,25 * (x_1 - 30)/5 * (x_2 - 4)/2 + 0,75 * (x_1 - 30)/5 * (x_3 - 5)/5 + 1,125 * (x_2 - 4)/2 * (x_3 - 5)/5 + \\ & + 0,1875 * [(x_1 - 30)/5]^2 + 0,5625 * [(x_2 - 4)/2]^2 + 2,0625 * [(x_3 - 5)/5]^2 \end{aligned}$$

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	0,20	0,20	0,10	0,10	0,15

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
Продолжительнос- ть 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	10,5 1	10,5	10,5	10,5	10,5 5	10,5	10,5
2	Влажность шихты, %	9,46	10,3	10,3 1	10,2 9	10,3 3	10,3 0	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)	
	т/м ² час	г	%	г	%	г	%
Номер опыта							
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

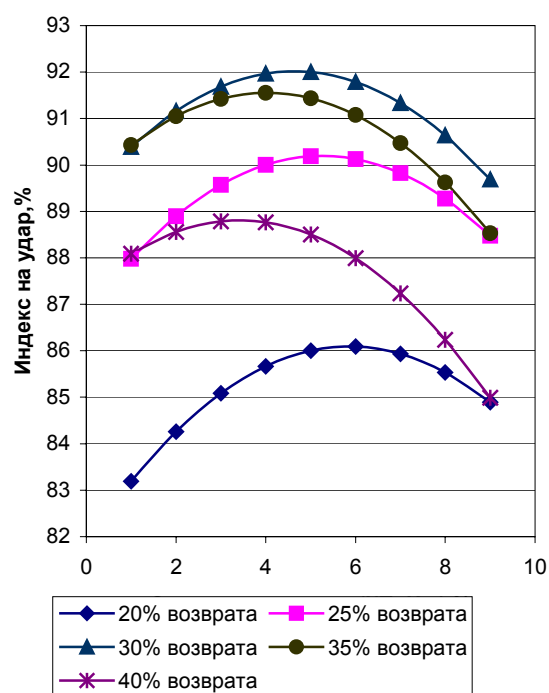


Рисунок 1 - Зависимость ИНУ от содержания ферритной смеси

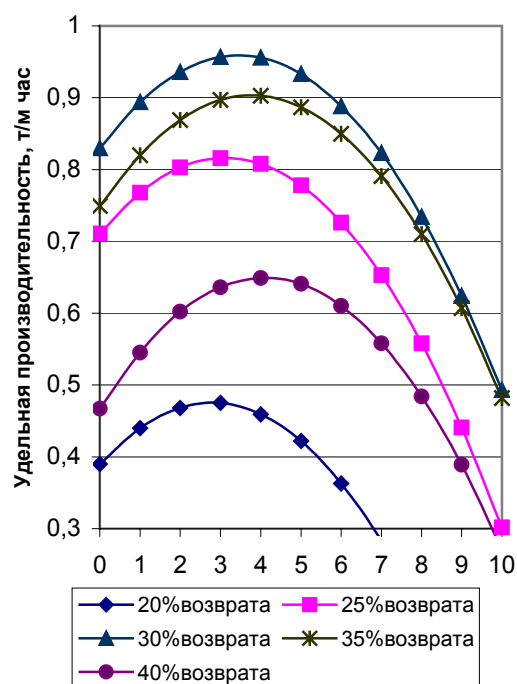


Рисунок 2 - Зависимость УП от содержания ферритной смеси

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.

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 связей 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]:

$$\Delta Z_T = \Delta H_{298}^0 - T \cdot \Delta S_{298}^0 - a \cdot T \cdot \gamma(T),$$

$$\text{где } \gamma(T) = \ln(T/298) + (298/T) - 1.$$

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

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

$$\Delta Z_T^0 = [-215.476 \cdot 10^3 - 15.48 \cdot T - 19.664 \cdot T \cdot \gamma(T)] \quad (5.1);$$

$$\Delta Z_T^0 = [-30.961 \cdot 10^3 - 17.15 \cdot T - 60.754 \cdot T \cdot \gamma(T)] \quad (5.5);$$

$$\Delta Z_T^0 = [-297.064 \cdot 10^3 - 175.97 \cdot T - 1.129 \cdot T \cdot \gamma(T)] \quad (4.1);$$

$$\Delta Z_T^0 = [+320.494 \cdot 10^3 - 340.24 \cdot T - 23.263 \cdot T \cdot \gamma(T)] \quad (4.6);$$

$$\Delta Z_T^0 = [+12.782 \cdot 10^3 - 15.85 \cdot T - 1.673 \cdot T \cdot \gamma(T)] \quad (5.10);$$

$$\Delta Z_T^0 = [+18.338 \cdot 10^3 - 23.63 \cdot T - 2.426 \cdot T \cdot \gamma(T)] \quad (5.9);$$

$$\Delta Z_T^0 = [-29.652 \cdot 10^3 - 30.12 \cdot T - 6.945 \cdot T \cdot \gamma(T)] \quad (5.7).$$

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	$\text{CaCO}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 = \text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CO}_2$	$\text{CaO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 = \text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$
2	$3\text{CaCO}_3 + 2\text{SiO}_2 = 3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 + 3\text{CO}_2$	$3\text{CaO} + 2\text{SiO}_2 = 3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2$
3	$2\text{CaCO}_3 + \text{SiO}_2 = 2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 + 2\text{CO}_2$	$2\text{CaO} + 2\text{SiO}_2 = 2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$
4	$3\text{CaCO}_3 + \text{SiO}_2 = 3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 + 3\text{CO}_2$	$3\text{CaO} + \text{SiO}_2 = 3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$
5	$\text{CaCO}_3 + \text{SiO}_2 = \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 + \text{CO}_2$	$2\text{CaO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 = 2\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$
6	$2\text{CaCO}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 = 2\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 + 2\text{CO}_2$	$\text{CaO} + \text{SiO}_2 = \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$
7	$\text{SFe}_3\text{O}_4 + \text{SCO} + \text{SiO}_2 + \text{SCaCO}_3 =$ $= \text{CaO}_{0.5} \cdot \text{FeO}_{1.5} \cdot \text{SiO}_2 + \text{CO}_2$	$\frac{2}{3}\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{SiO}_2 + \text{CO} = 2\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2 + \frac{2}{3}\text{CO}_2$
8	$\frac{1}{3}\text{Fe}_3\text{O}_4 + \frac{1}{3}\text{CO} + \text{SiO}_2 + \text{CaCO}_3 =$ $= \text{CaO} \cdot \text{FeO} \cdot \text{SiO}_2 + 1\frac{1}{3}\text{CO}_2$	$2\text{FeO} + \text{SiO}_2 = 2\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$
9		$\text{SFe}_3\text{O}_4 + \text{SCO} + \text{SiO}_2 + \text{SCaO} =$ $= \text{CaO} \cdot \text{FeO} \cdot \text{SiO}_2 + \text{SCO}_2$
10		$\frac{1}{3}\text{Fe}_3\text{O}_4 + \frac{1}{3}\text{CO} + \text{SiO}_2 + \text{CaO} =$ $= \text{CaO} \cdot \text{FeO} \cdot \text{SiO}_2 + \frac{1}{3}\text{CO}_2$

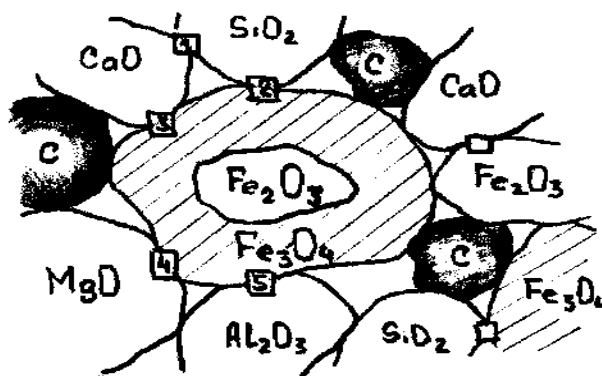


Рисунок 3 - Схема контактов между оксидами агломерационной шихты

1- Ca_2SiO_4 ; 2- Fe_2SiO_2 ; 3- CaFe_2O_4 ; 4- $\text{Mg}_x\text{Fe}_{3-x}\text{O}_4$; 5- FeAlO_3

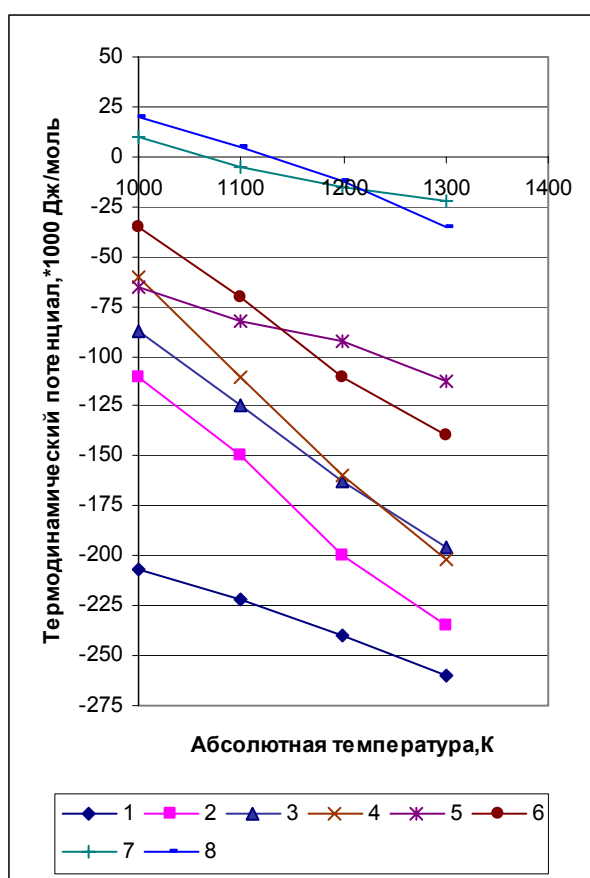


Рисунок 4

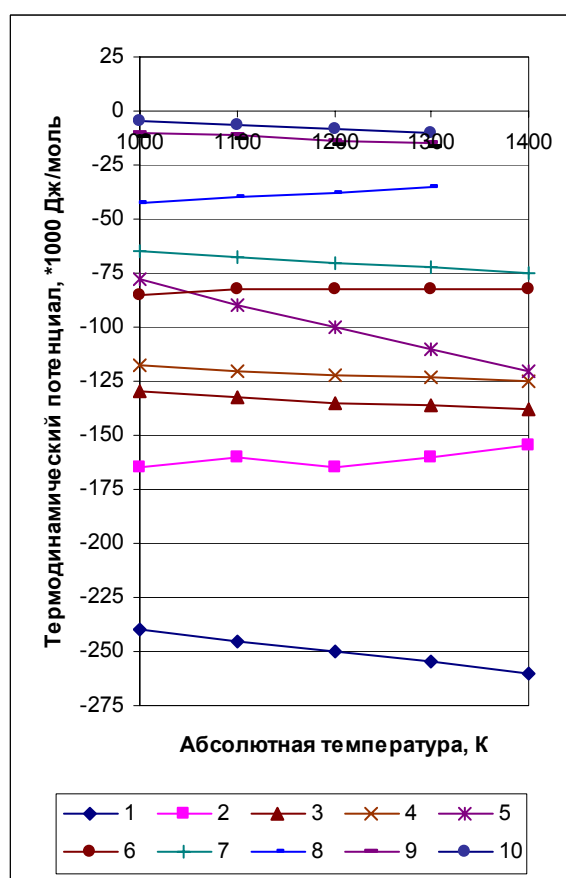


Рисунок 5

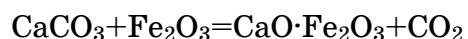
Зависимость термодинамических потенциалов некоторых реакций от температуры.

Благодаря большому 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°C 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°C) наблюдается значительное снижение массы образцов, что связано в первую очередь с началом реакции ферритообразования и удалением CO₂:



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°C 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 связано 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°C.

Так потеря массы равная 500 мг для совместно измельченной смеси достигается при температуре 700°C, а для неизмельченной смеси и только колошниковой пыли – в интервале температур 800-830°C. 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.

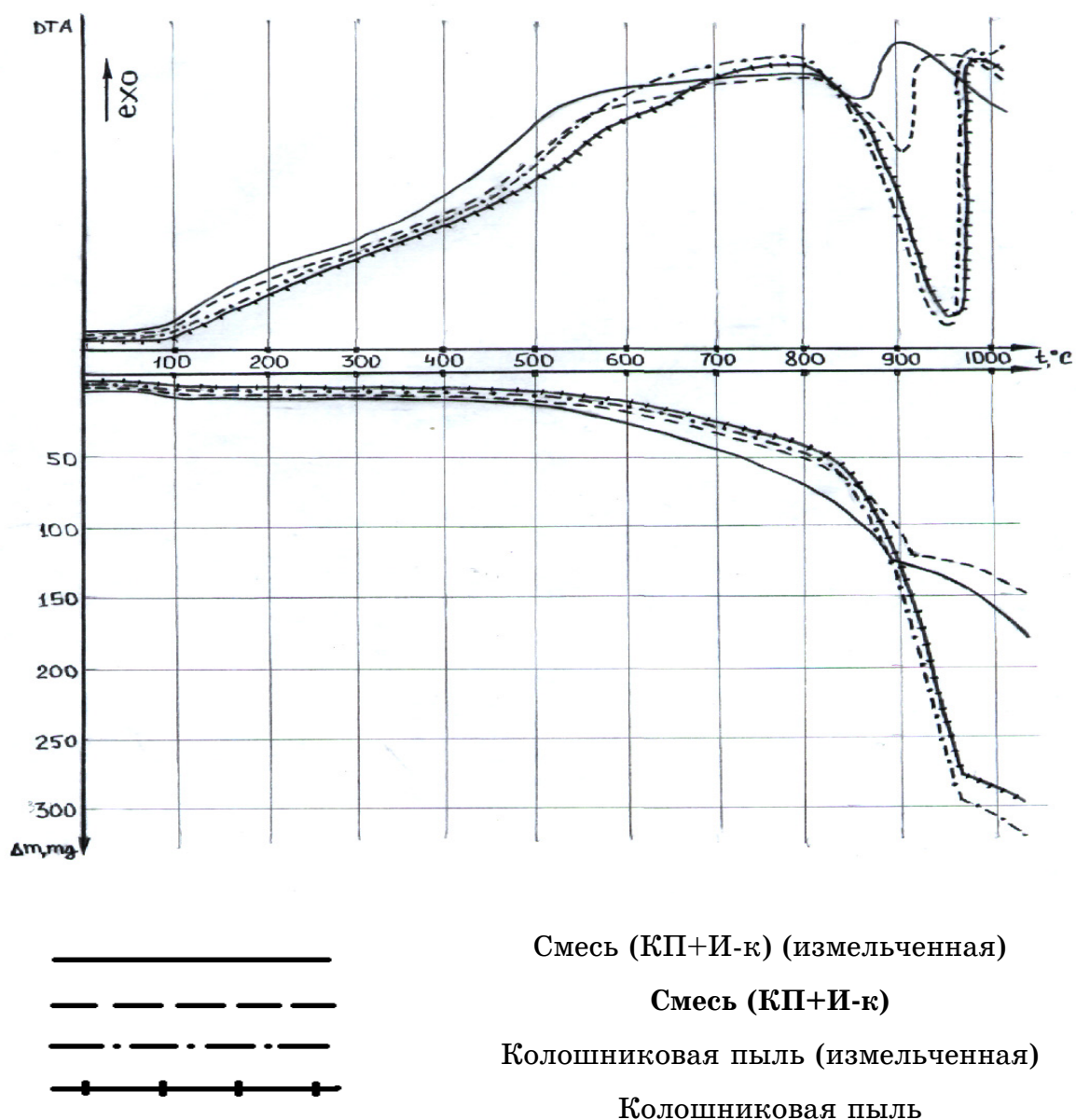


Рисунок 6 - Дифференциально-термический анализ

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, индекса 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°C 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 однокальцевого феррита снижается на 10-20°C.

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.

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 містять молибден, нікель і цирконій, в умовах конвертерного цеху комбінату «Криворіжсталь». Обґрунтовані 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

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:

- 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 ферромolibдена 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 ферромolibдена 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, отдельное транспортирование, хранение и использование строго по назначению легированной обрезки, 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 КГТМК «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 ферромolibдена 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 MoO₂ 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:

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

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

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

Полученная величина сопоставима со значением полного энергосодержания лома 0,2 МДж/кг и 6,9 МДж/кг, проводимым в литературе, что свидетельствует о существенном приращении 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

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 сталях, 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.

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 інжектуючі 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 инжестируемые 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 инъекции двухфазными струями частиц дисперсной фазы из литированных 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 инъекции двухфазными струями частиц дисперсной фазы из литированных оксидов металлов в приповерхностный слой металлической матрицы электрода является разгон микрочастиц в потоке холодного или слабopодогретого газа, поэтому образование прочного сцепления на контакте с основой возможно только за

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 инъекции 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 инъекции 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 нее транспортирующим новые порции инъектируемых 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 инъекции

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

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 активных оксидов и т. д. Поэтому исследование механизмов образования и развития приповерхностного слоя частиц для инъекционной 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 инъекции 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:

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

Образуем отношением частоты $\nu_{от}$ событий отскоков частиц к частоте ν ударов по поверхности всех частиц, на нее налетающих, параметр $K_o = \nu_{от} / \nu$, 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:

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

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

$$S_{эк} = \sigma \cdot N, \quad (3)$$

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

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

$$V_{\text{от}} = K_0 \frac{S - S_{\text{эк}}}{S} \cdot v. \quad (4)$$

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

$$V_{\text{сч}} = \frac{S_{\text{эк}}}{S} \cdot v. \quad (5)$$

Используя соотношения (4) и (5), сформируем функциональную связь величин $\frac{S_{\text{эк}}}{S}$ и K_0 , соответствующую условию равенства интенсивностей событий отскоков частиц высокоскоростной двухфазной струи от поверхности и от частиц, локализованных вблизи поверхности:

$$\frac{S_{\text{эк}}}{S} = \frac{K_0}{K_0 + 1}. \quad (6)$$

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:

$$N = v_{\text{от}} \cdot t = K_0 \frac{S - S_{\text{эк}}}{S} \cdot v \cdot t = K_0 \frac{S - \sigma \cdot N}{S} \cdot v \cdot t. \quad (7)$$

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

$$dN = K_0 \cdot \left(1 - \frac{\sigma \cdot N}{S}\right) \cdot v \cdot dt. \quad (8)$$

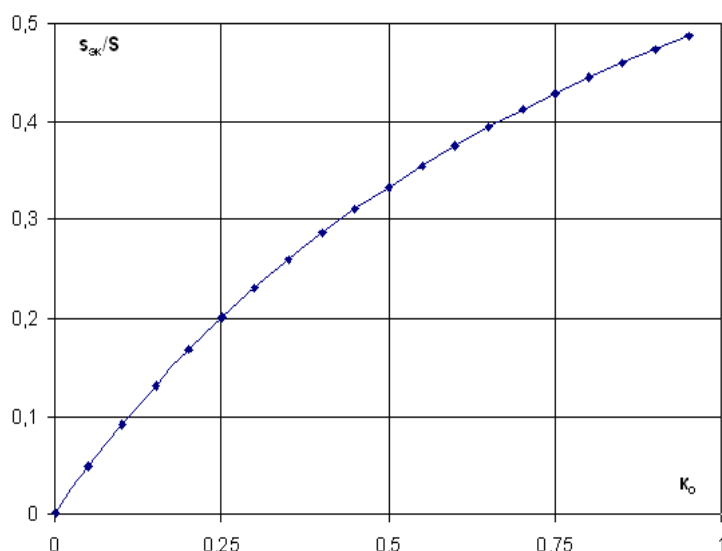


Рисунок 1 - Линия равной интенсивности пополнения частицами приповерхностного экранирующего слоя по механизмам соударений их с поверхностью и с частицами этого слоя

Решение уравнения (8), представим в виде:

$$N = \frac{S}{\sigma} \left(1 - e^{-\frac{\sigma \cdot K_0 \cdot v \cdot t}{s}} \right). \quad (9)$$

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

$$N = K_0 \cdot v \cdot t \quad (10)$$

(линия 1), не учитывающей этого фактора, рассчитанная для одного и того же набора численных значений параметров K_0 , V 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 1 см^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 τ_{cp} после входа. Отметим, что “равновесное” количество N частиц в экранирующем слое над единицей поверхности может определяться балансом пополнения отскокившими 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 $t = \tau_{cp}$ стационарного в последующем экранирующего слоя с числом составляющих его частиц, определяемым соотношением:

$$N = k_0 \cdot v \cdot \tau_{cp} \quad (11)$$

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.

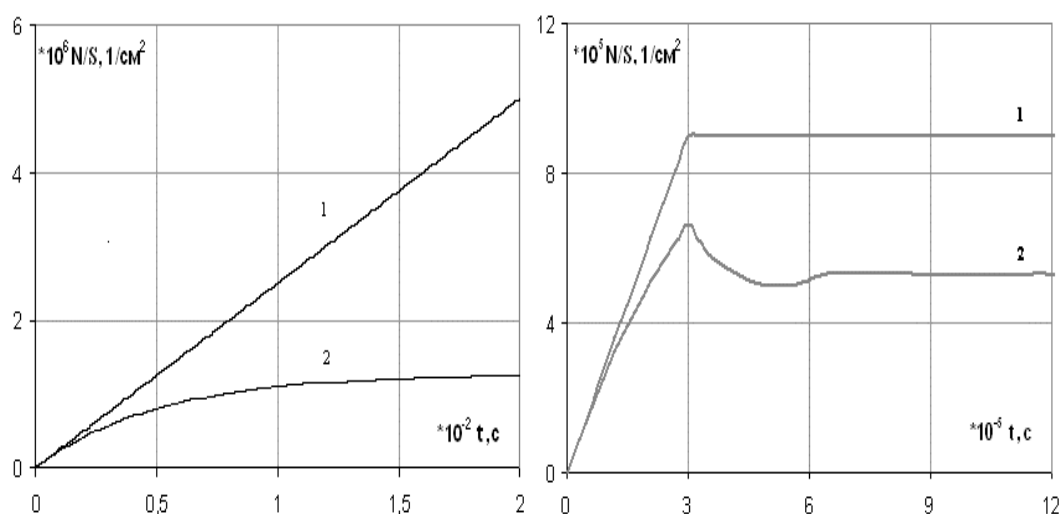


Рисунок 2 - Примеры динамик формирования экранирующего поверхность слоя отскакивающими от нее частицами без учета (а) и с учетом (б) выхода частиц из него через время τ_{cp} после входа, а также без учета (1) и с учетом (2) уменьшения доступной для инъекции частицами поверхности вследствие ее экранирования.

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:

$$N = N_0 + v_{\text{сч}} \cdot t = N_0 + \frac{s_{\text{эк}}}{s} \cdot v \cdot t = N_0 + \frac{\sigma \cdot N}{s} \cdot v \cdot t. \quad (12)$$

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

$$dN = \frac{\sigma \cdot N \cdot v}{s} dt. \quad (13)$$

Решение уравнения (13) представим в виде:

$$N = N_0 \cdot e^{\frac{\sigma \cdot v \cdot t}{s}}. \quad (14)$$

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 $\tau_{\text{ср}}$ после входа, рассчитанных для одного и того же набора численных значений параметров v , σ и N_0 .

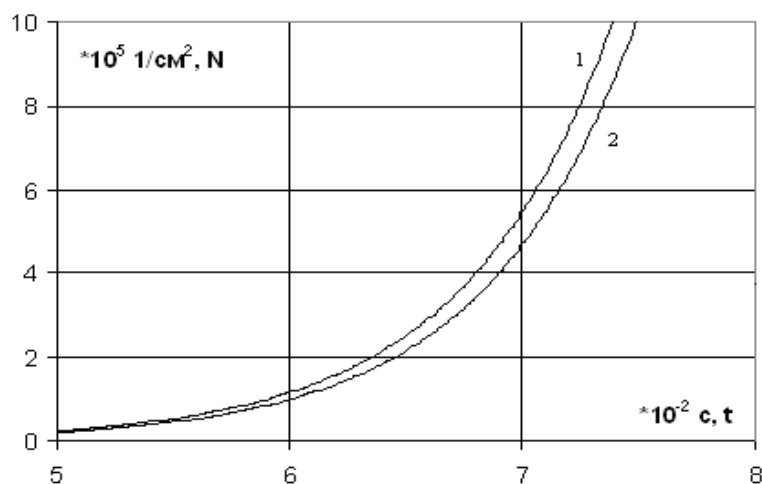


Рисунок 3 - Динамика образования экранирующего слоя при формировании его соударениями между частицами без учета (1) и с учетом (2) выхода частиц из него через время $\tau_{\text{ср}}$ после входа

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 $\tau_{\text{ср}}$ пребывания частиц в этом слое и частоты v , 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 $v - (1-9) \cdot 10^8 \text{ 1/(с} \cdot \text{см}^2)$ и времени $\tau_{\text{ср}} - (1-10) \cdot 10^{-5} \text{ с}$ соответствует диапазон $0,013 - 0,173 \text{ с}$ 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.

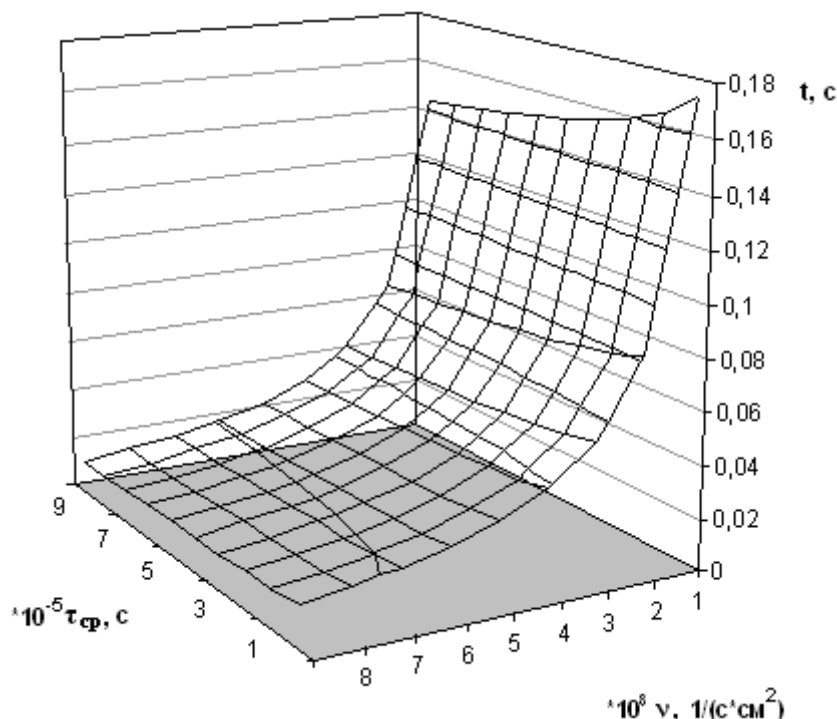


Рисунок 4 - Пример оценки длительностей достижения уровня 50%-го экранирования поверхности слоем, формируемым по механизму соударения между частицами, в зависимости от среднего времени $\tau_{ср}$ пребывания частиц в слое и частоты V .

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:

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

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.

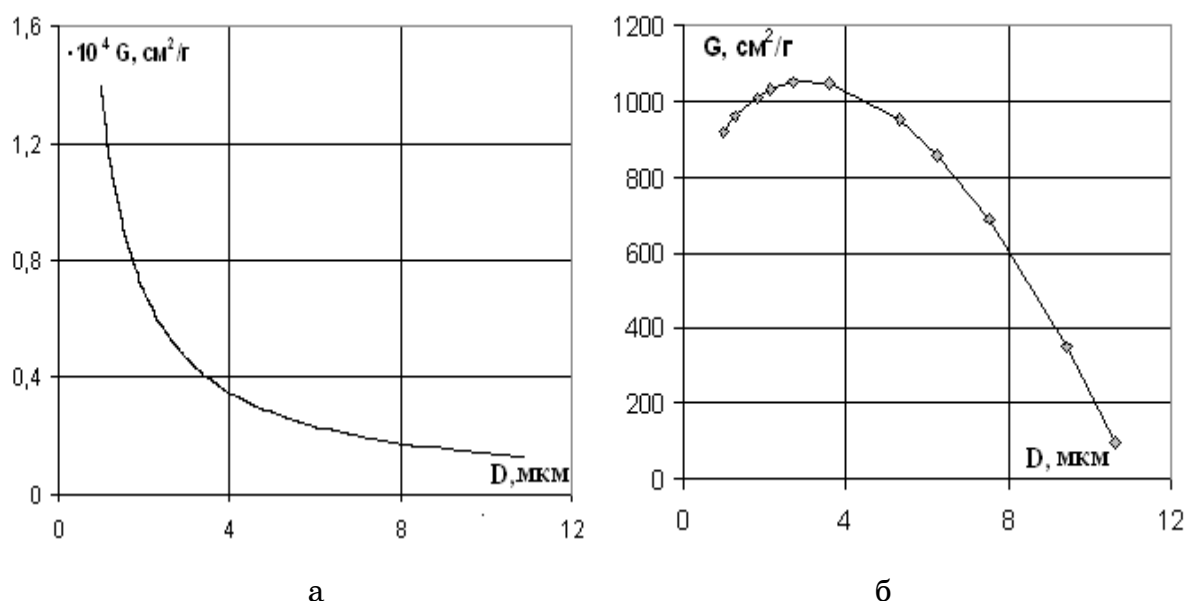


Рисунок 5 - Зависимость от размера экранирующих частиц площади экранирования, приходящейся на единицу их массы: (а) – для модельных монодисперсных наборов частиц; (б) – полидисперсного их набора.

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 инъекции 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 Саратов. ун-та, 2005. – 568 с.
2. Kalinuskina Y., Pinchuk S., Levko O. Lithium manganese dioxide (LiMn_2O_4) 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.).

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., Головки 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 тепломасопереносу”. – 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.

ПРОКОРОДОВАНІЙ 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,

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 металеві 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

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 гідролісної 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.

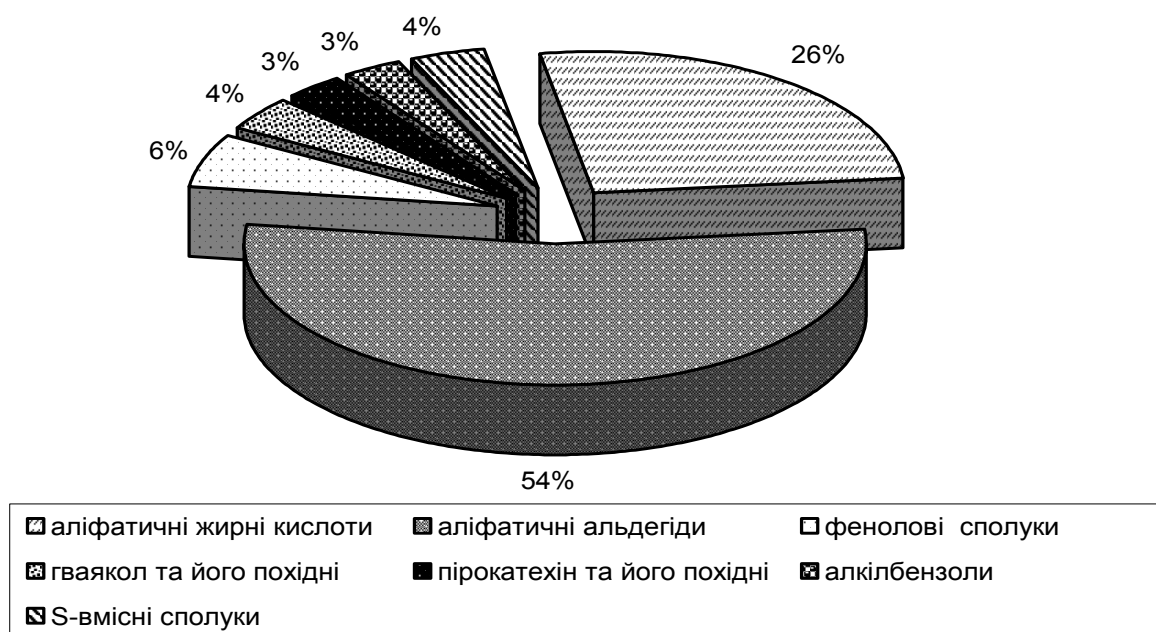
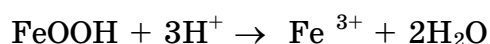


Рисунок 1 - Діаграма розподілу основних типів сполук у водних екстрактах кісточкових порошків

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

Природа механізму «перетворюючої» дії кісточної 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 кислоти до 3) хімічно агресивні і здібні розчинювати оксиди металів за реакцією:



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].

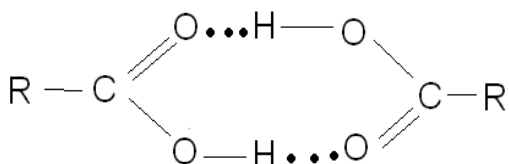


Рисунок 2 - Схема утворення водневих зв'язків між молекулами жирних кислот

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

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).

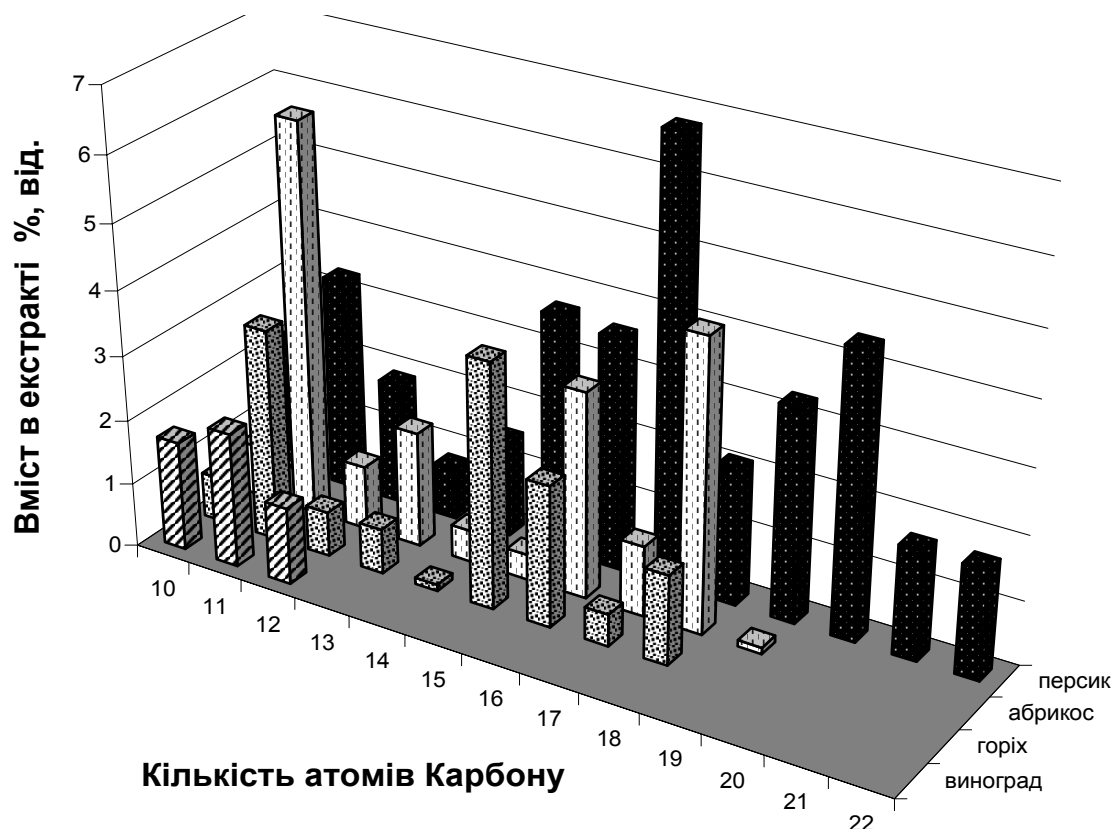


Рисунок 3 - Розподіл жирних кислот в водних екстрактах кісточкових порошків

Результати досліджень хімічного складу плівок (методом Оже-спектроскопії на установці JEOL-10S фірми Jamp), утворених 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 кісточної сировини по відношенню до продуктів атмосферної корозії є результати розрахунку (за даними оже-спектрометрії) співвідношення атомів Оксигена і Феруму 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 Феруму 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 Феруму в окисленому шарі підвищується, а кількість Оксигену – знижується [7].

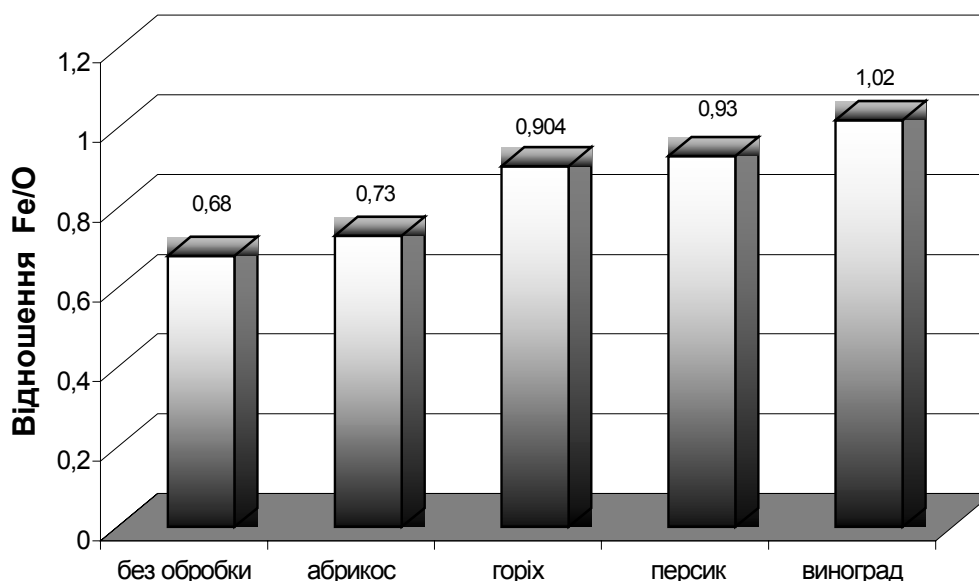


Рисунок 4 - Вплив обробки екстрактами на співвідношення атомів Феруму і Оксигену в поверхневому шарі металу з продуктами корозії

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

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.

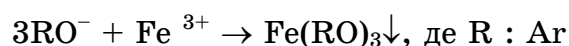
«Модифікуючий» вплив кісточної сировини на продукти атмосферної корозії

Крім часткового розчинення продуктів атмосферної корозії (головним чином, лепідокрокиту), 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 кісточної 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 кісточної сировини, показано, що пірокатехін (наряду з жирними кислотами) є другою хімічно активною складовою екстрактивної частини кісточної 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:



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

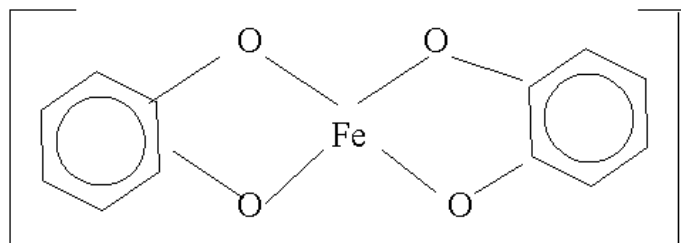


Рисунок 5 - Схема комплексу пірокатехіну із Ферумом при рН =4,25 [6]

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.

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 // Проблемы коррозії 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

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. Проведено оцінювання технологічних параметрів процесу виплавки марганцевих ферросплавів 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

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:

$$\underline{E}_i \leq E_i \leq \bar{E}_i, i = \overline{1, M}, \quad (1)$$

где $\underline{E}_i, \bar{E}_i$ - 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

$$\sum_{j=1}^N \tilde{X}_j = 1, \quad (2)$$

что соответствует одновременной справедливости двух неравенств:

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^N \tilde{X}_j &\leq 1, \\ \sum_{j=1}^N \tilde{X}_j &\geq 1. \end{aligned} \quad (3)$$

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

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

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:

$$\underline{X}_j \leq \tilde{X}_j \leq \overline{X}_j, j = \overline{1, n}, \tag{5}$$

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

$$\begin{aligned}
 Y_{1k} &= X_k - \tilde{X}_1 - \tilde{X}_2 - \dots - \tilde{X}_N \geq 0, \\
 Y_{1k+1} &= -\tilde{X}_k + \tilde{X}_1 + \tilde{X}_2 + \dots + \tilde{X}_N \geq 0,
 \end{aligned} \tag{6}$$

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

Система (4), (6) избыточна, поскольку количество неизвестных $(\tilde{X}_1, \tilde{X}_2, \dots, \tilde{X}_N, Y_1, Y_2, \dots, Y_{10+k*2})$ 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:

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

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:

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

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:

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

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

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

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

$$\begin{aligned}
 Y_1 &= \bar{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 - \dots - \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 + \dots + \frac{\tilde{E}_{1N} \cdot \tilde{\eta}_{1N}(E_1)}{\tilde{k}_N} \tilde{Z}_N \geq 0, \\
 Y_3 &= \bar{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 - \dots - \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 + \dots + \frac{\tilde{E}_{2N} \cdot \tilde{\eta}_{2N}(E_2)}{\tilde{k}_N} \tilde{Z}_N \geq 0, \\
 Y_5 &= \bar{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 - \dots - \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 + \dots + \frac{\tilde{E}_{3N} \cdot \tilde{\eta}_{3N}(E_3)}{\tilde{k}_N} \tilde{Z}_N \geq 0, \\
 Y_7 &= \bar{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 - \dots - \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 + \dots + \frac{\tilde{E}_{4N} \cdot \tilde{\eta}_{4N}(E_4)}{\tilde{k}_N} \tilde{Z}_N \geq 0,
 \end{aligned} \tag{11}$$

Условие (2) преобразуется к виду:

$$\sum_{j=1}^N \tilde{Z}_j = 1, \tag{12}$$

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:

$$Y_0 = \sum_{j=1}^N \frac{C_j}{\tilde{k}_j} \tilde{Z}_j \rightarrow \min. \tag{13}$$

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

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

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:

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

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 $\mu_{ij}(\tilde{E}_{ij}), \mu_{ij}(\tilde{\eta}_{ij}), i=1, M, j=1, N$.

Предположим, что имеется два вида экспертных оценок: согласно первой, так как нечетко заданные величины определены интервалами $[\underline{E}_{ij}, \bar{E}_{ij}]$, $[\underline{\eta}_{ij}, \bar{\eta}_{ij}]$ 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:

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

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 ,

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.

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

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

параметр a примем равным 1;

ширина функции принадлежности задается выражением:

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

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

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

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

Результирующие функции принадлежности находятся с использованием численного метода [1]. Все функции $\mu(\tilde{E}_{ij}), \mu(\tilde{\eta}_E), i=1, \overline{M}, j=1, \overline{N}$ 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 α -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:

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

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

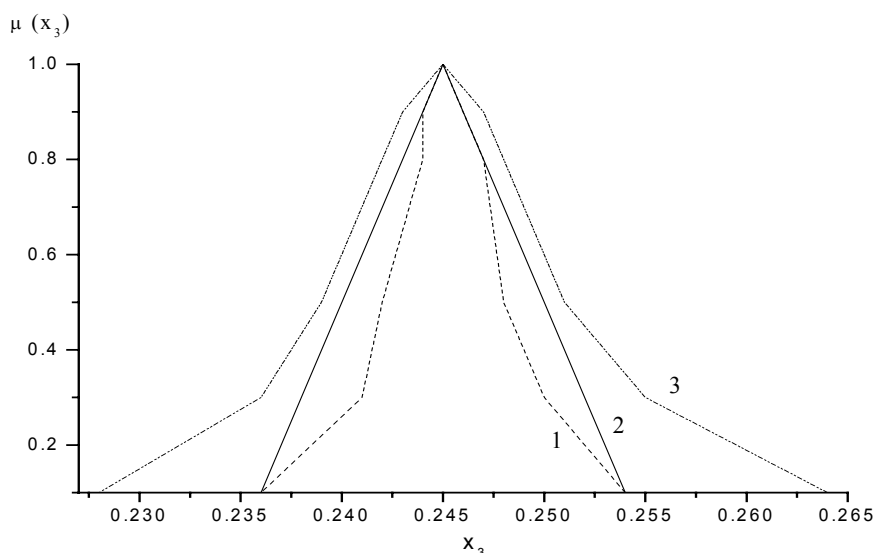


Рисунок 1 - Функции принадлежности $\mu(\tilde{x}_3)$ долевой части компонента шихты кварцита при различных видах экспертных оценок входных переменных: 1, 3 – колоколообразная функция принадлежности вида при K равным соответственно 0.15 и 0.3; 2 – треугольная функция принадлежности

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

Заклучение. 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.

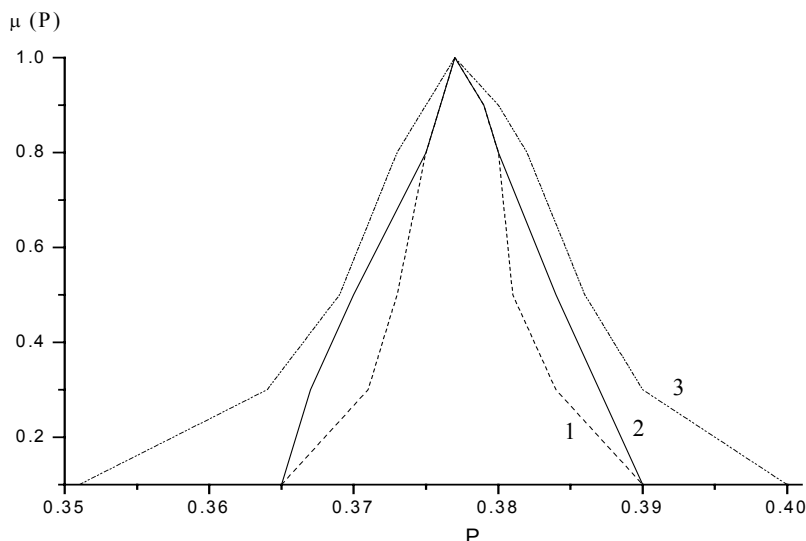


Рисунок 2 - Функции принадлежности содержания фосфора $\mu(P)$ в сплаве оптимального состава при различных видах экспертных оценок

ЛИТЕРАТУРА

1. Алтунин А.Е., Семухин М.В. Модели и алгоритмы принятия решений в нечетких условиях// Монография. - Тюмень: изд-во Тюменского государственного университета, 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 // Электromеталлургия. – 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.

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

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]

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

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

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

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.

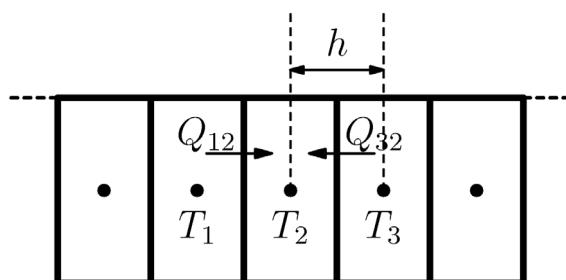


Рисунок 1 – Схематичное представление группы клеток с окрестностью Мура для одномерного случая

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

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

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

$$P = \frac{k S \Delta T}{h}.$$

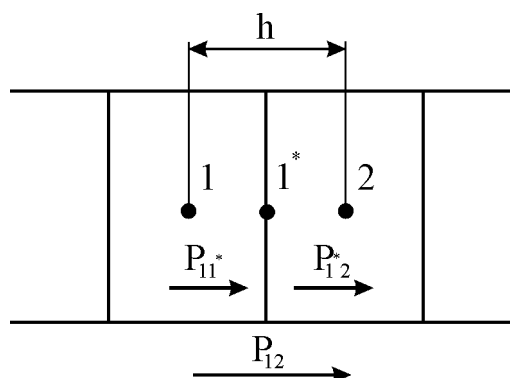


Рисунок 2 – Схема движения теплового потока между клетками

При этом тепловой поток между клетками 1 и 2 равен

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

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

$$P_{11^*} = \frac{k_1S(T - T_1)}{h/2},$$

со стороны клетки 2:

$$P_{12^*} = \frac{k_2S(T_2 - T)}{h/2}.$$

Исходя их равенства тепловых потоков на границе клеток $P_{11^*} = P_{12^*}$ находим T - температуру на границе клеток:

$$T = \frac{k_1T_1 + k_2T_2}{k_1 + k_2}.$$

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

$$k_{12} = \frac{2k_1k_2}{k_1 + k_2}. \quad (4)$$

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

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

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.

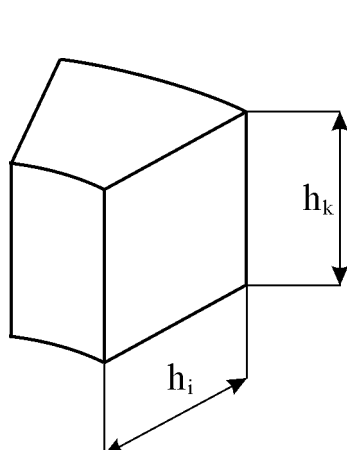


Рисунок 3 – Трехмерное изображение клетки в цилиндрической системе координат

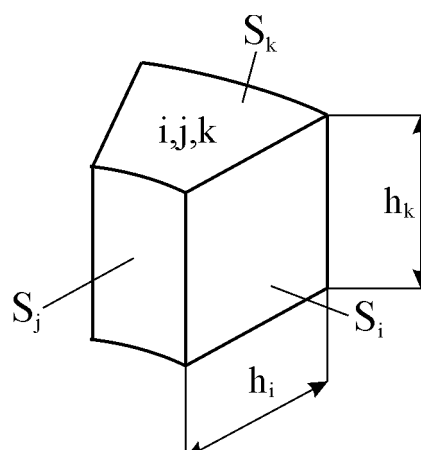


Рисунок 4 – Схематическое обозначение клетки и условные обозначения боковых площадей

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

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

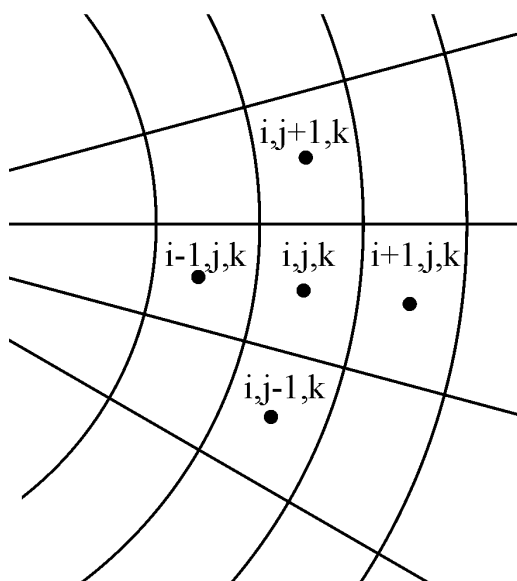


Рисунок - 5 Схематическое изображение клеток в цилиндрической системе координат (вид сверху)

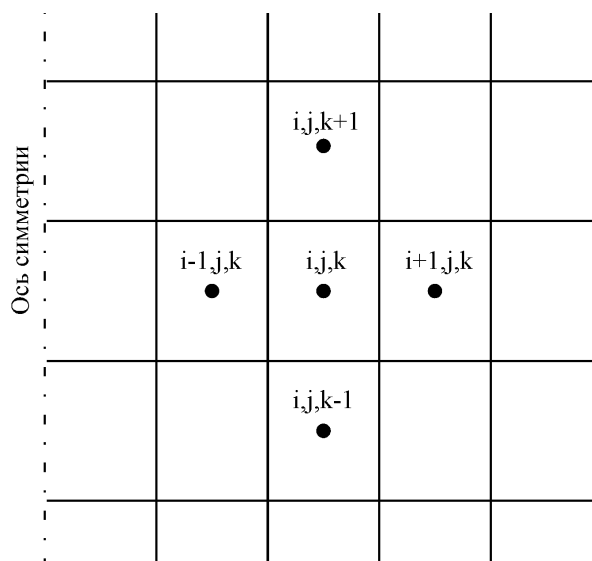


Рисунок 6 - Схематическое изображение клеток в цилиндрической системе координат (вид сбоку)

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):

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

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

для j сектора:

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

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

вдоль оси симметрии:

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

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

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

$$dQ_i = Q_{k-1,k}^{i,j} + Q_{k+1,k}^{i,j} + Q_{j-1,j}^{i,k} + Q_{j+1,j}^{i,k} + Q_{i-1,i}^{j,k} + Q_{i+1,i}^{j,k}.$$

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

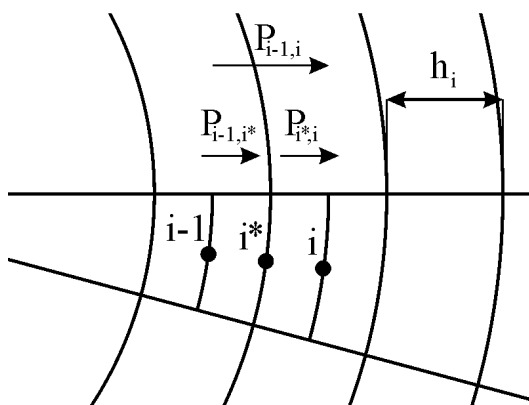


Рисунок 7 – Тепловые потоки между клетками для радиального распределения тепла

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

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

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

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

со стороны клетки i

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

Исходя из 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 вычислении 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:

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

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 :

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

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

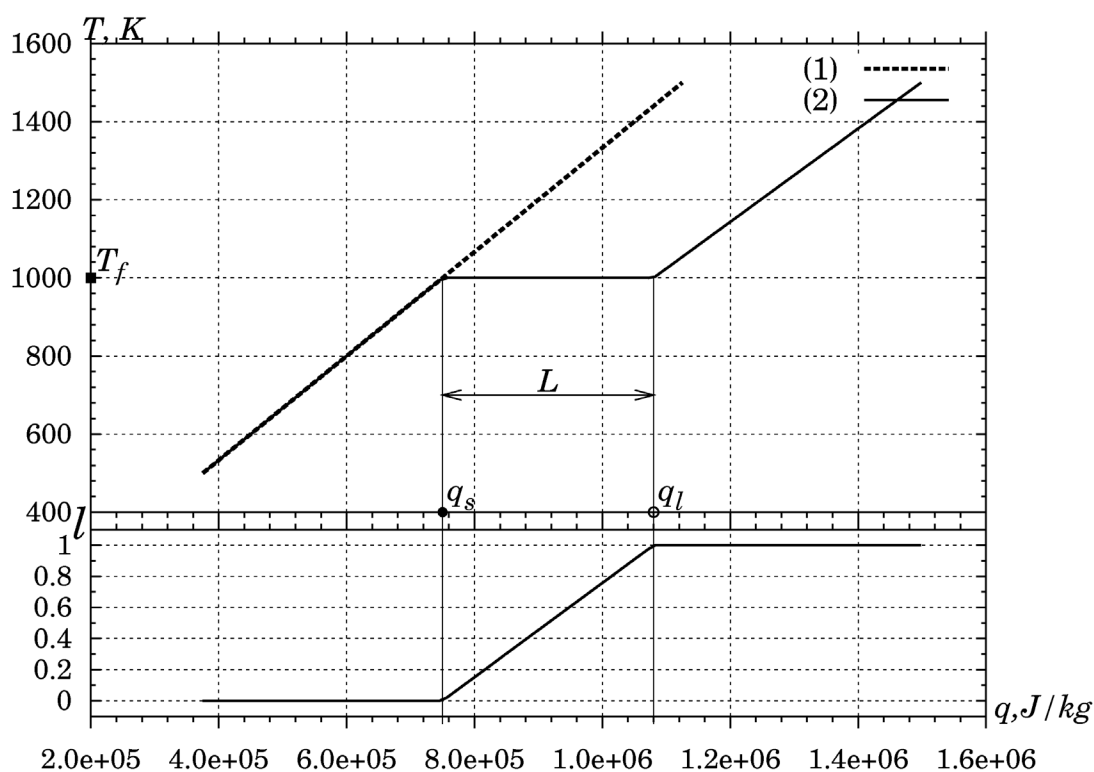


Рисунок 8 – Зависимости температуры и количества жидкой фазы от удельной энергии, 1 – при отсутствии фазового перехода, 2 – с учетом фазового перехода

Правило взаимосвязи удельной энергии q и температуры T выражается зависимостью

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

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

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

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

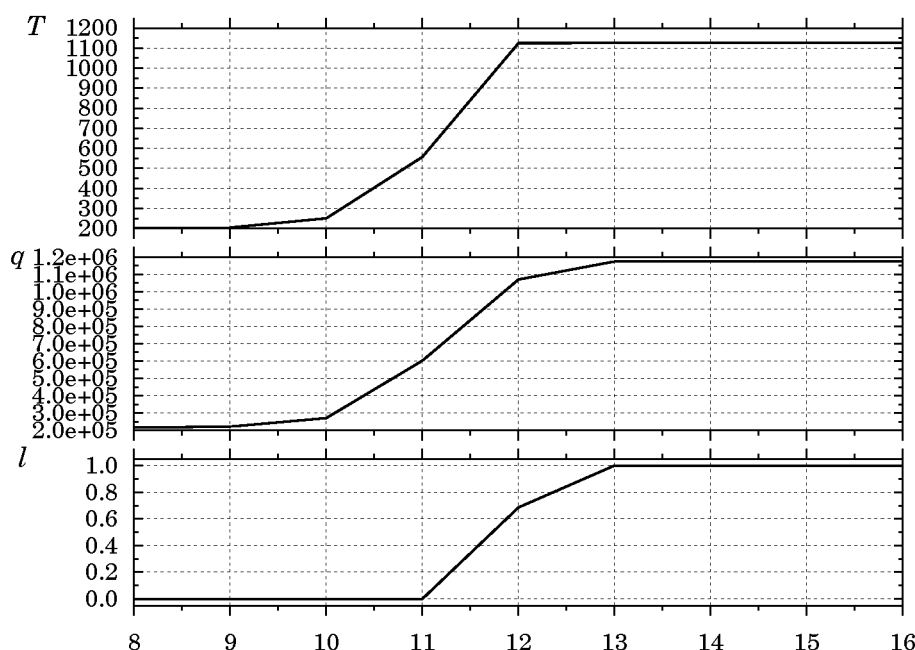


Рисунок 9 – Распределение а) – температуры, б) – удельной энергии, с) – доли жидкой фазы для клеток в зоне фазового перехода

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:

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

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

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

где α – коэффициент теплообмена $[Bm/m^2]$.

Для лучистого теплообмена граничное условие в терминах клеточных автоматов сформулировано как

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

где ε_0 – постоянная, характеризующая степень черноты тела, σ – постоянная Стефана-Больцмана.

Прикладная часть

Для тестирования предложенной математической модели разработано приложение на языке C++, 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. Рябенский, 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.

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 карбонітридним 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, микролегируемых 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

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 КСУ 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):

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

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:

$$\begin{aligned} R_1: & \text{ЕСЛИ } x_1 \text{ это } A_{11} \dots \text{И} \dots x_n \text{ это } A_{1n}, \\ & \text{ТО } y \text{ это } B_1 \\ R_i: & \text{ЕСЛИ } x_1 \text{ это } A_{i1} \dots \text{И} \dots x_n \text{ это } A_{in}, \\ & \text{ТО } y \text{ это } B_i \\ & \dots\dots\dots \\ R_m: & \text{ЕСЛИ } x_1 \text{ это } A_{m1} \dots \text{И} \dots x_n \text{ это } A_{mn}, \\ & \text{ТО } y \text{ это } B_m, \end{aligned} \quad (2)$$

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):

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

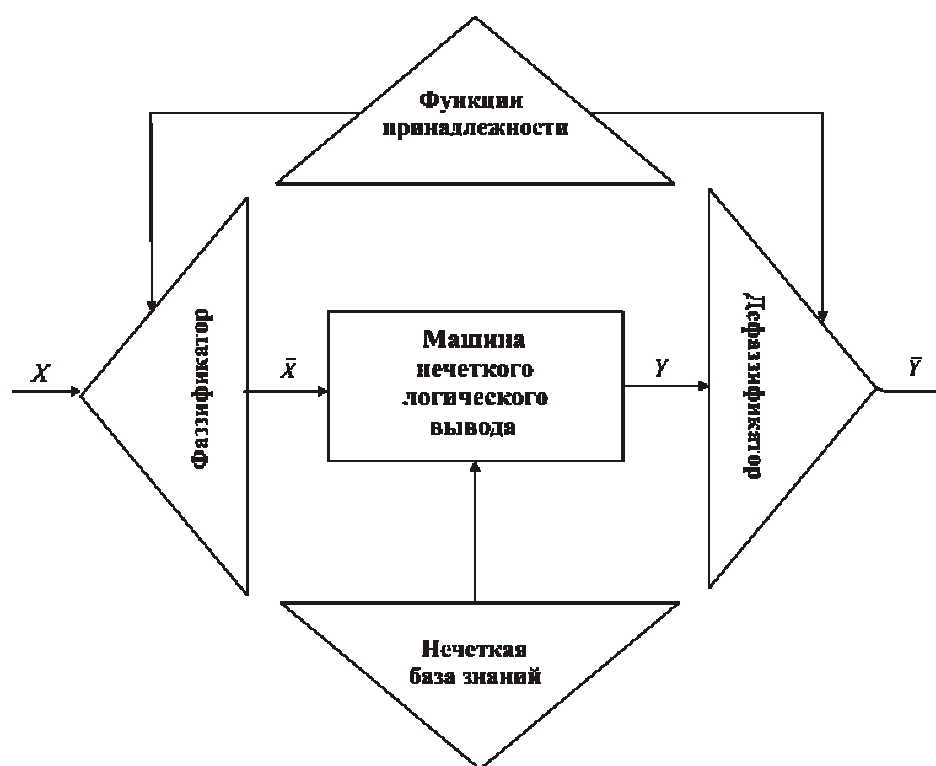


Рисунок 1 - Структура нечеткой системы

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

$$A_{ij}(\tilde{x}_j), i = \overline{1, m}, j = \overline{1, n}. \quad (3)$$

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:

$$\mu(y) = \max_i (B'_i(y)), i = \overline{1, m}, \quad (6)$$

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:

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

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”).

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

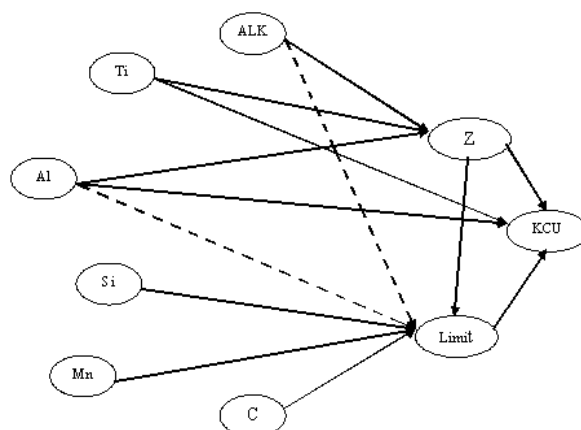


Рисунок 2 - Граф влияния технологических факторов на свойства стали 20 ГЛ (21 плавка, индукционная печь)

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 $T_1 = \{\text{«наименьший» (“VerySmall”), «малый» (“Small”), «средний» (“Middle”), «высокий» (“High”), «наивысший» (“VeryHigh”)}\}$. 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 $T_2 = \{\text{«наименьший» (“VerySmall”), «малый» (“Small”), «средний» (“Middle”), «высокий» (“High”), «наивысший» (“VeryHigh”)}\}$. 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 $T_3 = \{\text{«наименьший» (“VerySmall”), «малый» (“Small”), «средний» (“Middle”), «высокий» (“High”), «наивысший» (“VeryHigh”)}\}$. 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 $T_4 = \{\text{«наименьший» (“VerySmall”), «малый» (“Small”), «средний» (“Middle”), «высокий» (“High”), «наивысший» (“VeryHigh”)}\}$. 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 $T_5 = \{\text{«наименьший» (“VerySmall”), «малый» (“Small”), «средний» (“Middle”), «высокий» (“High”), «наивысший» (“VeryHigh”)}\}$. 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 $T_6 = \{\text{«наименьший» (“VerySmall”), «малый» (“Small”), «высокий» (“High”), «наивысший» (“VeryHigh”)}\}$. 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 $P_1 = \{\text{«min» (“Min”), «средний» (“Middle”), «max» (“Max”)}\}$. 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 $P_2 = \{\text{«min» (“Min”), «ниже среднего» (“BelowMiddle”), «средний» (“Middle”), «max» (“Max”)}\}$. Производится оценка по 465 бальной порядковой шкале, при которой цифре ≤ 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 $P_3 = \{\text{«min» (“Min”), «ниже среднего» (“BelowMiddle”), «средний» (“Middle”), «max» (“Max”)}\}$. Производится оценка по 465 бальной порядковой шкале, при которой цифре ≤ 390 соответствует наименьшая оценка, а цифре 465 – наибольшая оценка.

Для второго случая (45 плавов, 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

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 C» (“C”) будем использовать множество $T_1 = \{\text{«наименьший» (“VerySmall”), «малый» (“Small”), «средний» (“Middle”), «высокий» (“High”), «наивысший» (“VeryHigh”)}\}$. Производится оценка по 0,25 бальной порядковой шкале, при которой цифре 0,18 соответствует наименьшая оценка, а цифре 0,25 – наивысшая оценка;

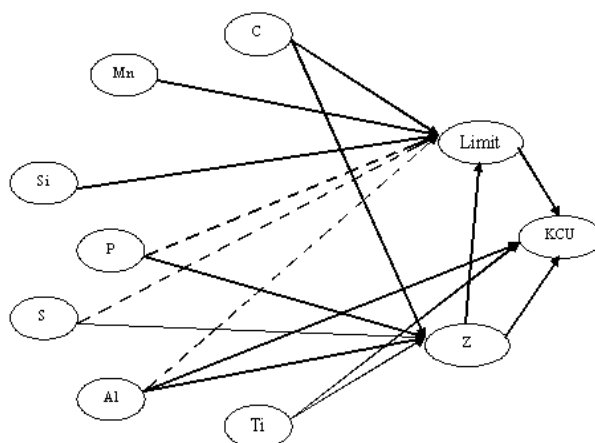


Рисунок 3 - Граф влияния технологических факторов на свойства стали 20 ГЛ (45 плавов по цеховой технологии)

2-ая ЛП: «уровень Mn» (“Mn”) будем использовать множество $T_2 = \{\text{«наименьший» (“VerySmall”), «малый» (“Small”), «средний» (“Middle”), «высокий» (“High”), «наивысший» (“VeryHigh”)}\}$. 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 $T_3 = \{\text{«наименьший» (“VerySmall”), «малый» (“Small”), «средний» (“Middle”), «высокий» (“High”), «наивысший» (“VeryHigh”)}\}$. 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 P» (“P”), будем использовать множество $T_4 = \{\text{«наименьший» (“VerySmall”), «малый» (“Small”), «средний» (“Middle”), «высокий» (“High”), «наивысший» (“VeryHigh”)}\}$. Производится оценка по 0,025 бальной порядковой шкале, при которой цифре 0,016 соответствует

5-ая ЛП: «уровень S» (“S”), будем использовать множество $T_5 = \{\text{«наименьший» (“VerySmall”), «малый» (“Small”), «средний» (“Middle”), «высокий» (“High”), «наивысший» (“VeryHigh”)}\}$. 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 $T_6 = \{\text{«наименьший» (“VerySmall”), «малый» (“Small”), «высокий» (“High”),$

«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 $T_6 = \{\text{«наименьший» (“VerySmall”), «малый» (“Small”), «высокий» (“High”), «наивысший» (“VeryHigh”)}\}$. 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 $P_1 = \{\text{«min» (“Min”), «средний» (“Middle”), «max» (“Max”)}\}$. 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 $P_2 = \{\text{«min» (“Min”), «ниже среднего» (“BelowMiddle”), «средний» (“Middle”), «max» (“Max”)}\}$. Производится оценка по 415 бальной порядковой шкале, при которой цифре ≤ 360 соответствует наименьшая оценка, а цифре 415 – наибольшая оценка;

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

Таблица 3

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

п/п	Входы						Выходы		
	АЛК	Ti	Al	Si	Mn	C	Z	σ_r	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 плавов (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 плавов по цеховой технологии.

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 принадлежности 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 «КСУ» и «предел текучести» (рис. 5).

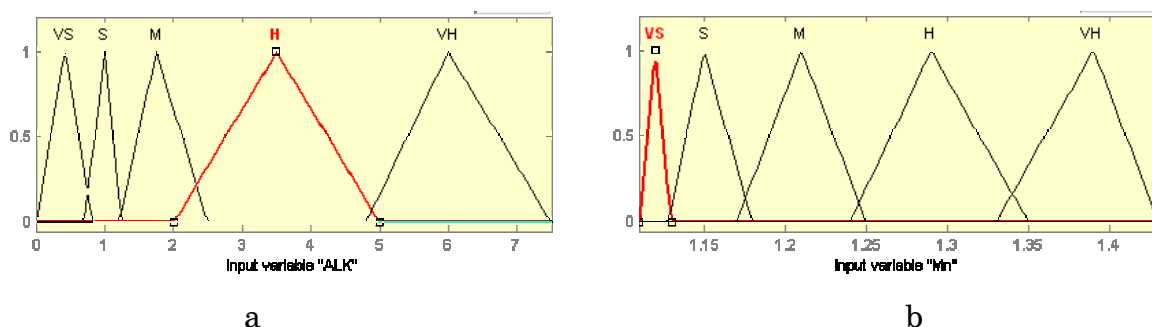


Рисунок 4 - Функции принадлежности входных ЛП: а) «содержание АЛК» и б) «уровень Mn»

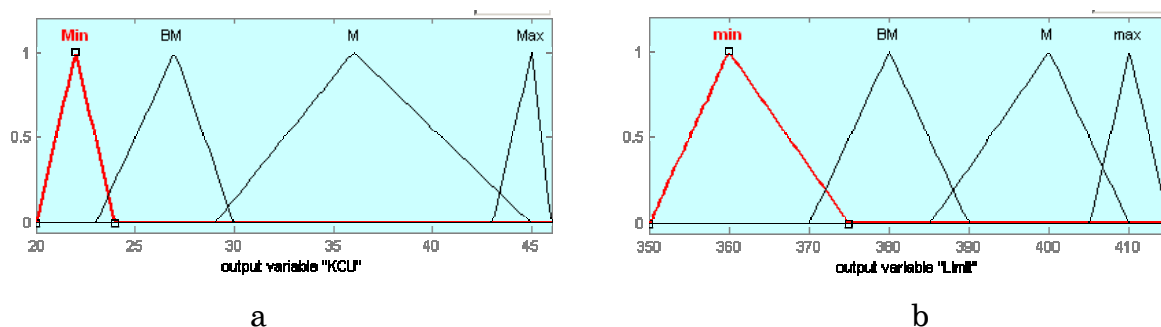


Рисунок 5 - Функции принадлежности выходных ЛП: а) «КСУ» и б) «предел текучести»

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 С - 0,205%; балл зерна 9,35 (9,10,8); предел текучести составляет 418 МПа и ударная вязкость KCU – 44.5 при -60 °С.

Таблица 5

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

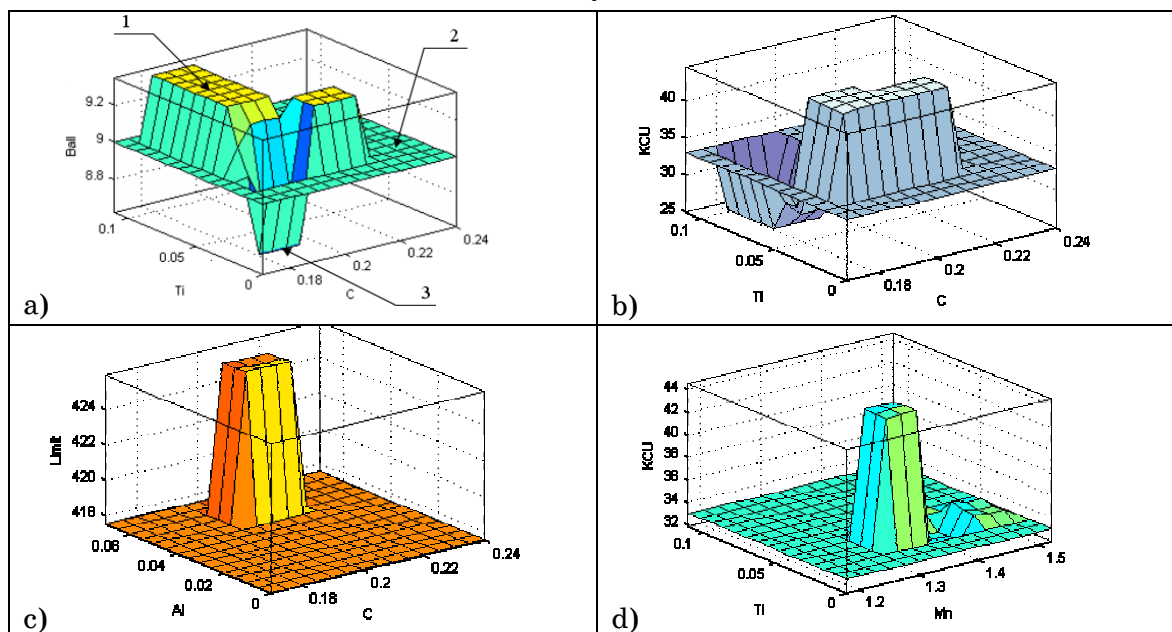
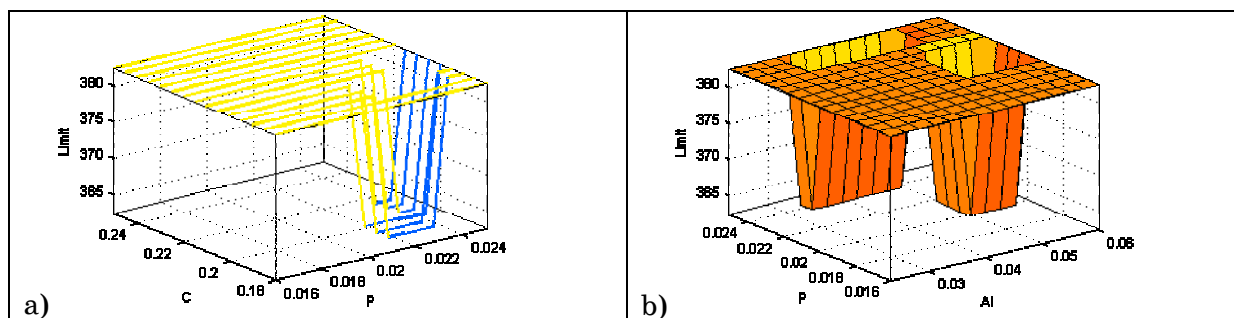
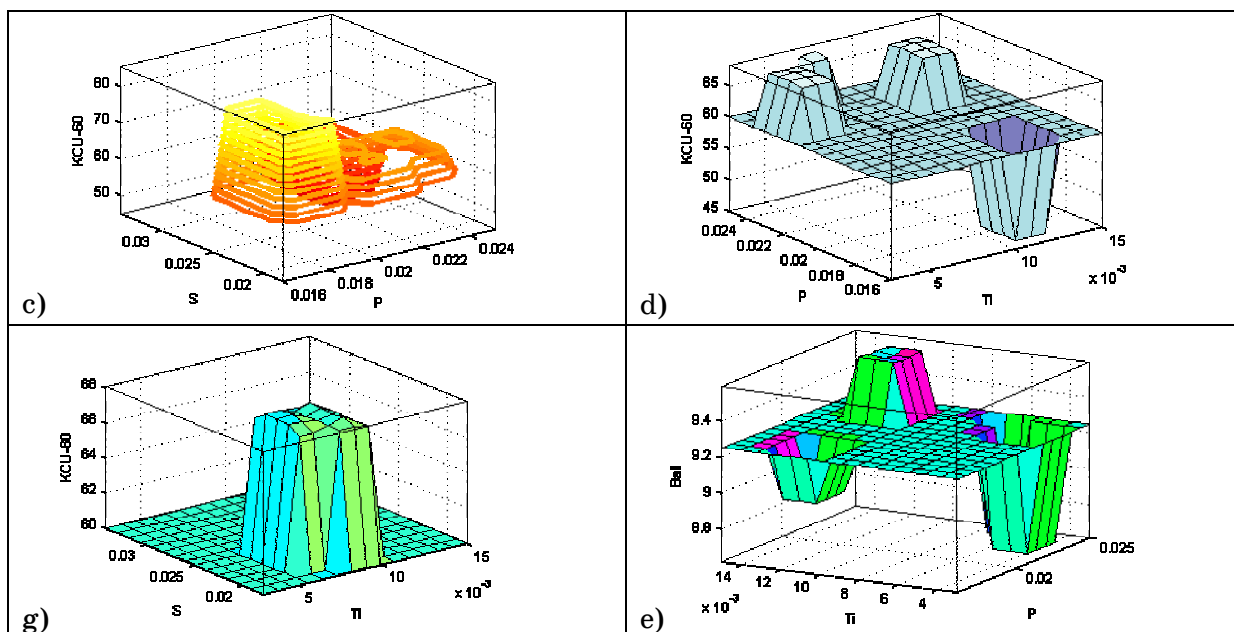


Таблица 6

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





Для 45 плавов, 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 $-60^{\circ}C$.

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 плавов 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°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 плавов, 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)	$\geq 380-420$ (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. — 368 с.
3. Круглов В.В., Дли М.И., Голунов Р.Ю. Нечеткая логика искусственные нейронные сети: Учеб. пособие. — М.: Издательство Физико-математической литературы, 2001. — 224 с.
4. Новикова Е.Ю. Идентификация процесса выплавки FeSi с использованием алгоритмов нечеткого логического вывода - Нові технології №3(9) – 2005.- 222-224 с.: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. — 311 с.
6. М.И. Гольдштейн, А.В. Гринь, Э.Э. Блюм и др. Упрочнение конструкторских сталей нитридами — М.: Металлургия, 1970-200 с.
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. — 736 с.: ил.

В.И. Головки, О.Н. Кукушкин, Н.В. Михайловский, А.В. Потапов,
А.Ф. Хасянов, В.В. Смокий

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;

- профилометрии 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 ($0,25 \text{ кг/м}^3$) металлургической пыли в условиях работы при температуре от -40 до $+1700^\circ\text{C}$ (с учетом дополнительной защиты аппаратуры по месту измерения), давлении до 0,4 МПа, разрежении до 1 мбар, количестве отходящих газов до $3000 \text{ м}^3/\text{мин}$, 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 $P_{\text{пер}}$. При

одних и тех же значениях $R_{\text{пер}}$ и расстояния для различных материалов относительное изменение величины R_0 отражательной способности может быть определено отношением значений напряженности отраженного электромагнитного поля $E_{\text{пр}}$ принимаемых сигналов. В более простом варианте величина R_0 может быть оценена отношением среднеквадратических значений напряжения $U_{\text{пр}}$, пропорциональных $E_{\text{пр}}$, относительно базового объекта измерения [3].

Проверка технических возможностей системы контроля уровня металлургических материалов выполнена на основе анализа величины R_0 материалов при нормальном падении электромагнитной волны [4]. Собственная оценка R_0 базовых объектов проводилась относительно напряжения $U_{\text{пр}}$. Зависимости $U_{\text{пр}}$ от расстояния H_m (в диапазоне от 1 до 10 м) определены для базовых объектов сравнения: (углового отражателя – $U_{\text{пр}}^{\text{УО}}$, металлического экрана – $U_{\text{пр}}^{\text{Э}}$, бетонной поверхности – $U_{\text{пр}}^{\text{Б}}$) полиномами третьего порядка (при коэффициенте детерминированности $R^2_d = 0,90...0,97$) соответственно в виде

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

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

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

Установленные значения R_0 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 40° угла падения радиолуча на поверхность сыпучего материала. Важным результатом является также возможность идентификации вида исследуемых 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/м³) 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°C, кусковатости 0...300 мм, углах откоса до 50° и запыленности до 30 г/м³. В статическом состоянии сыпучего тела разница в показаниях расстояния радаром и механическими замерах 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_k 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_d). Определение значений h_k по f_d при перемещении куска материала конвейером (с частотой вращения n_6 и радиусом R_6 барабана) выполнялось по разнице скоростей $V_{дм}$ (рис. 1)

$$V_{дм} = V_d - V_{дб} = 2\pi n_6 [(R_6 - h_k) \cos \alpha_q - R_6 \cos \alpha_6], \quad (4)$$

где α_q – угол между направлением доплеровских скоростей V_d точек материала высотой h_k и соответствующих линейных скоростей V_l , $\alpha_q = 90^\circ - (\alpha_{ц} - \rho_d - \alpha_d)$; α_6 – угол между направлением доплеровских скоростей $V_{дб}$ точек поверхности барабана и соответствующих им линейных скоростей $V_{лб}$, $\alpha_6 = 90^\circ - (\alpha_{ц} - \rho_d)$; $\rho_d = 90^\circ - \alpha_0$; α_d – ширина диаграммы направленности антенны (ДНА).

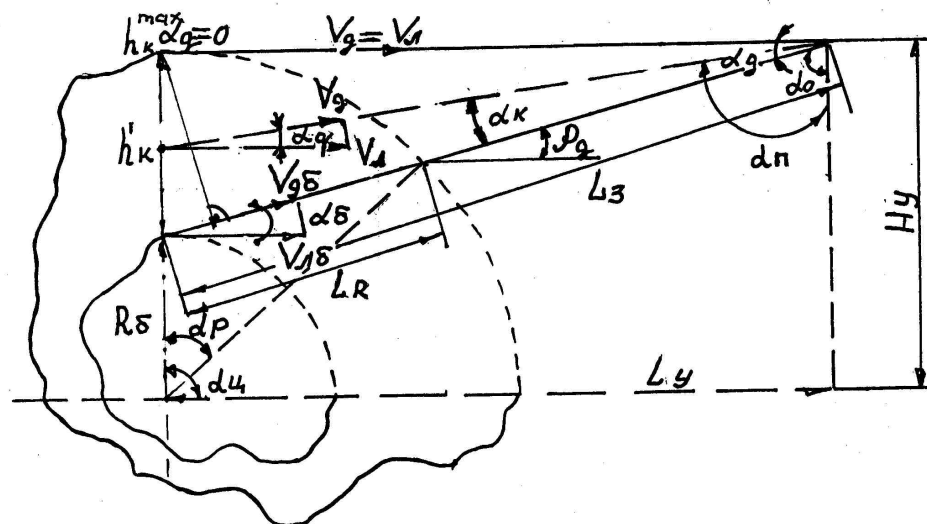


Рисунок 1 - Разница доплеровских скоростей в пределах диаграммы направленности антенны α_d

Из-за изменения направления вектора скорости V_l одной и той же точки куска h_k на угле α_d с изменением доплеровской скорости до

величины $V'_{\text{дм}} = 2\pi \cdot n_{\text{б}} \cdot (R_{\text{б}} + h_{\text{к}}) \cdot \cos \alpha_{\text{б}}$ предпочтительным является определение размера куска в момент его появления в угле $\alpha_{\text{ц}}$. Тогда при $L_3 = \text{const}$ 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

$$h'_k \cdot \sin(\alpha_{\text{ц}} + \alpha'_k - \rho_{\text{д}}) / \sin \alpha_k = h_{\text{max}} \cdot \sin(\alpha_{\text{ц}} + \alpha_{\text{д}} - \rho_{\text{д}}) / \sin \alpha_{\text{д}}. \quad (5)$$

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

$$f'_{\text{д}} = 500 \cdot \pi \cdot n_{\text{б}} (R_{\text{б}} + h'_k) \cdot \sin(\alpha_{\text{ц}} - \rho_{\text{д}} + \alpha'_k). \quad (6)$$

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 $f_{\text{д}}$ 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 $f_{\text{д}}$ 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 $U_{\text{ск}}$, $f_{\text{ср}}$, 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.

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 $\alpha_{\text{пi}}$ сенсорного блока (СБ) системы и измеренного расстояния H_{pi} , равны

$$\begin{cases} X_i = R_{\text{п}} - \Delta x - H_{\text{pi}} \cdot \sin(\alpha_{\text{пi}} + \psi_{\text{н}}), \\ Y_i = H_{\text{pi}} \cos(\alpha_{\text{пi}} + \psi_{\text{н}}) - \Delta y, \end{cases} \quad (7)$$

где $R_{\text{п}}$ – радиус колошника доменной печи; Δx , Δy – расстояние от оси вращения СБ до стенки печи и нулевого уровня засыпи шихты; $\psi_{\text{н}}$ – 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)

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

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

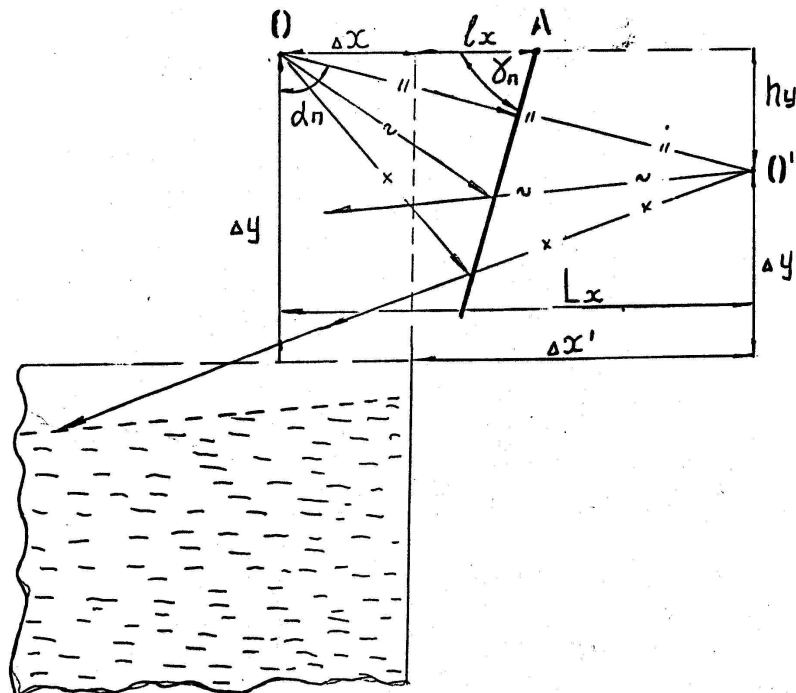


Рисунок 2 - Определение профиля поверхности с переотражателем радиосигнала

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 $\Delta Y = |Y_2 - Y_1| \leq J_k$ величины Y_2 и Y_1 усредняются. Значение среднего арифметического Y_{2cp} 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^{cp} 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 γ_{ni} откоса поверхности.

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

$$\beta_c^i = \arccos \left[\frac{(H_p^i)^2 + (C_u^i)^2 - (H_p^{i-1})^2}{2 \cdot H_p^i \cdot C_u^i} \right], \quad (9)$$

$$C_u^i = \sqrt{(H_p^{i-1})^2 - 2 \cdot H_p^{i-1} \cdot H_p^i \cdot \cos \alpha_{ni} + (H_p^i)^2}. \quad (10)$$

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_i^k , определяемой по каждому трем последовательным значениям X_i , Y_i с величиной приращений ΔX_i , ΔY_i . Радиус $R_i^k = D_i / (2 \cdot \sin \psi_i^k)$ описанной окружности с хордой D_i и дугой ψ_i^k определяется с учетом выражений (рис. 3)

$$\psi_i^k = \arccos \left(\frac{G_i^2 + G_{i+1}^2 - D_i^2}{2 \cdot G_i \cdot G_{i+1}} \right), \quad (11)$$

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

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

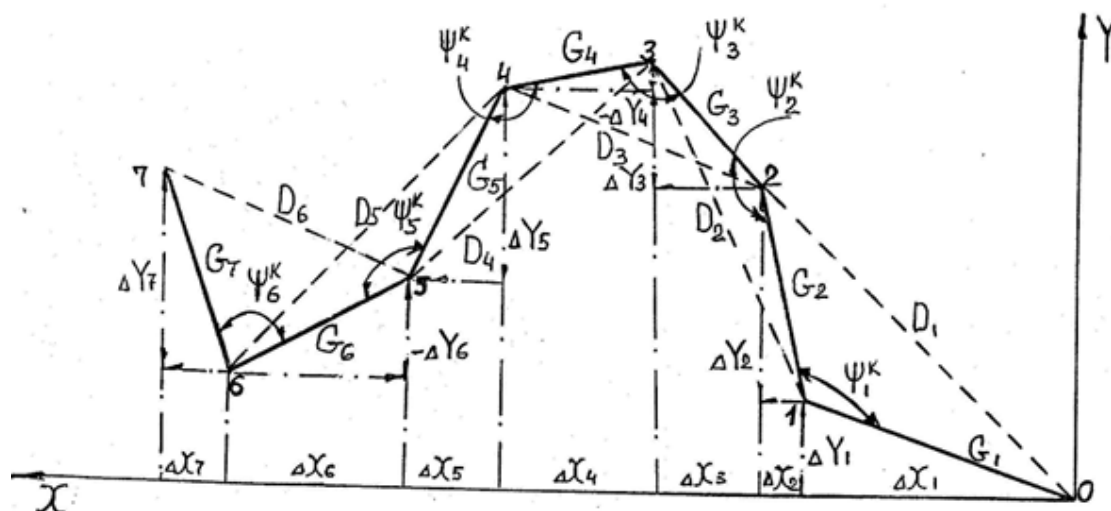


Рисунок 3 - Определение поверхностной неравномерности материала

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 профилометрии впервые проведены на доменной печи объемом 5000 м³ 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 плавов 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°C, запыленность – до 200 г/м³, 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 плавов, 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 м³/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 $t_{\text{сп}}$ на заполнение расплавом свободного пространства конвертера и заданного времени t_t управляющих воздействий. Величина $t_{\text{сп}}$ является следствием изменения уровня H_t и скорости V_t 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.

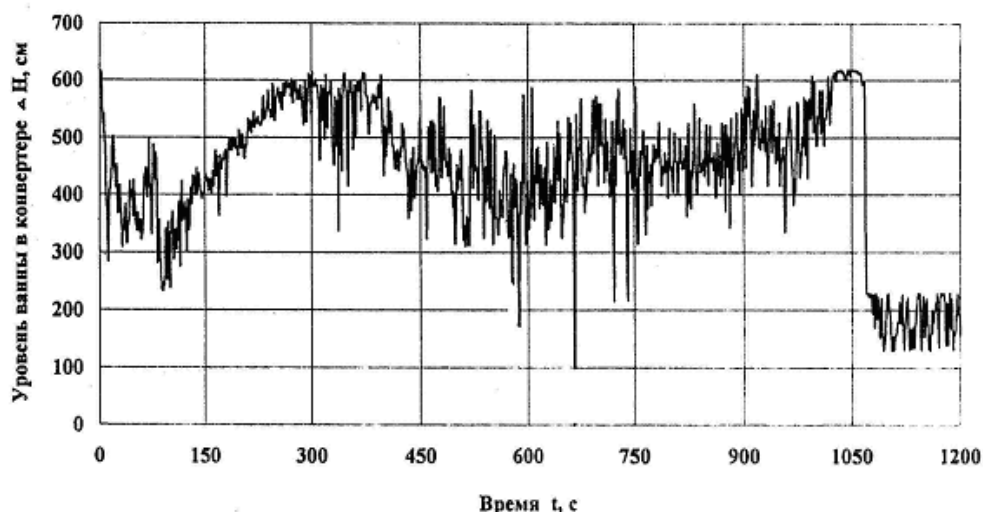


Рисунок 4 - Изменение уровня расплава по ходу плавки

Анализ связи параметров радиолокационного зондирования с характеристиками шлаков проводился по величине R_o . Установлено, что величина R_o при локации поверхности жидкого чугуна практически соответствует значению ее для металлического листа. Выбросы из конвертера продуктов плавления возникают при величине $R_o < 0,3$, что может служить определенным критерием хода плавки. Согласно полученным регрессионным зависимостям R_o (при коэффициенте корреляции не ниже 0,8) с увеличением в шлаке содержания $Fe_{общ}$ коэффициент отражения шлака снижается. Это соответствует параметрам дутьевого режима плавки, 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

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 ($v_{\text{п}} = 5$ мм/с) и величине $\tau_{\text{уп}} = T_{\text{уп}}$ (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 стального ковша 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 стальной (через выпарные отверстия). Макетный образец измерителя влажности (частота излучения 37,5 ГГц, апертура антенны 40 мм) был изготовлен по схеме СВЧ-влажномеров 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 $7,2 \times 4,0$ мм²) 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, профилометрии 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. Головкин, 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. Головки, 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. Головки, 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. Головки, 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. Головки, 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. Головки, 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. Головки 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. Головки, 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. Головки, 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. Головки, 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. Головки, 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. Головки, А.Ф. Хасянов и др. // Труды 2-го конгресса сталеплавыльщиков. – 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. Головки 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. Головки, Л.А. Головки 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.Головки, В.К.Гулый и др. // Сталь. – 1996. – № 12. – С. 20–21.
 17. Определение влажности огнеупорных металлургических материалов микроволновым скатерометром / В.И. Головки, 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.

ИМПУЛЬСНЫЕ ГАЗОРАЗРЯДНЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ ПУШКИ ДЛЯ НИЗКОВАКУУМНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Приводятся результаты экспериментальных исследований вольт-амперных характеристик, созданных газоразрядных электронных пушек ЭПП-6 и высоковольтной – ЭПП-14 с полым анодом и холодным катодом для низковакуумных технологий в диапазоне давлений ниже $P < 1200$ Па, при ускоряющих напряжениях $U_a < 100$ кВ. Максимальная мощность инжектируемого электронного пучка в импульсе составляла $N_u \leq 10^6$ Вт.

Приводяться результати експериментальних досліджень вольт-амперних характеристик, створених газорозрядних електронних гармат ЭПП-6 і високовольтної – ЭПП-14 з порожнім анодом і холодним катодом для низько вакуумних технологій в діапазоні тисків нижче $P < 1200$ Па, при прискорювальних напругах $U_a < 100$ кВ. Максимальна потужність інжектуємого електронного пучка в імпульсі становила $N_u \leq 10^6$ Вт.

Results of experimental researches volt-ampere characteristics, created gas-discharge electronic guns ЭПП-6 and high-voltage - ЭПП-14 with the hollow anode and the cold cathode for low vacuum technologies in a range of pressure below $P < 1200$ Pa, at accelerating voltage $U_a < 100$ kV. The maximal capacity of an injected electronic beam in an impulse made $N_u \leq 10^6$ W.

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 (ЭПП), работающих на принципе извлечения электронного пучка из высоковольтного тлеющего разряда (ВТР) при давлениях $P < 10$ Па

[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).

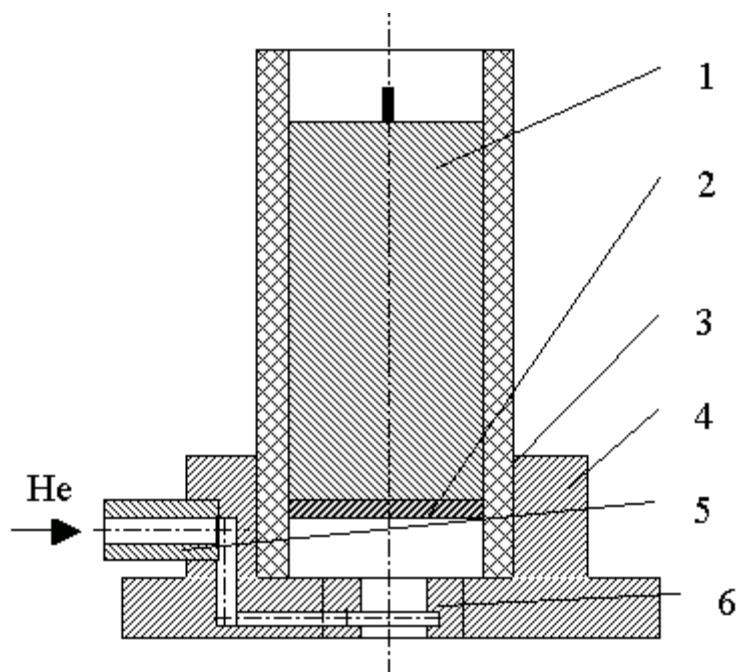
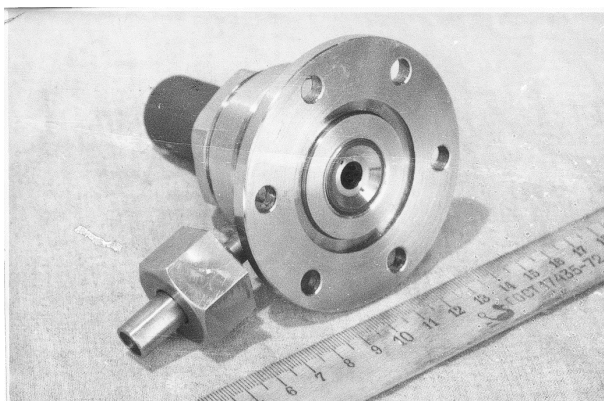


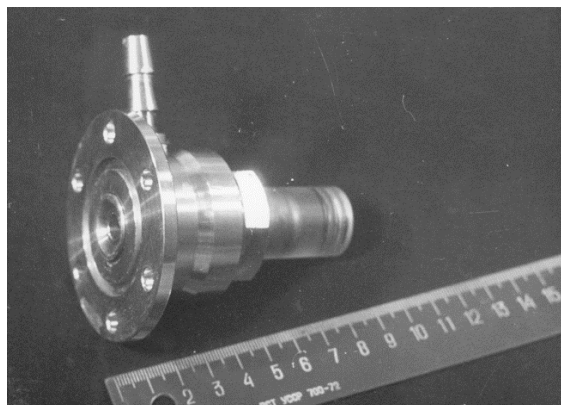
Рисунок 1 - Схема газоразрядной электронной пушки ЭГП-6

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 изоляции 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

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 - $U \leq 40 \text{ кВ}$;
- длительность импульса напряжения - $\tau_u \leq 5 \text{ мкс}$;
- частота следования импульсов - $f_c \leq 400 \text{ Гц}$;
- диаметр электронного пучка - $d \geq 5 \text{ мм}$;
- мощность электронного пучка в импульсе - $P_u \leq 350 \text{ кВт}$;
- время непрерывной работы - $t_p \leq 0,5 \text{ час}$;
- вес пушки - $0,7 \text{ кг}$.

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 ЭП-14 (рис.3, 4).

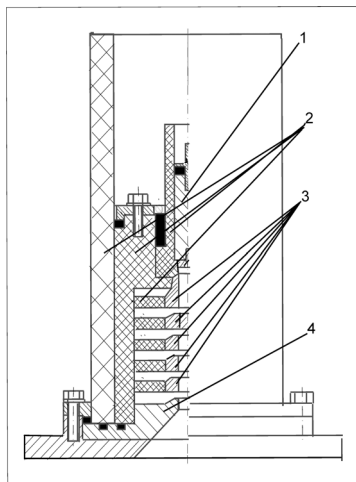


Рисунок 3 - Схема высоковольтной газоразрядной электронной пушки ЭП- 14

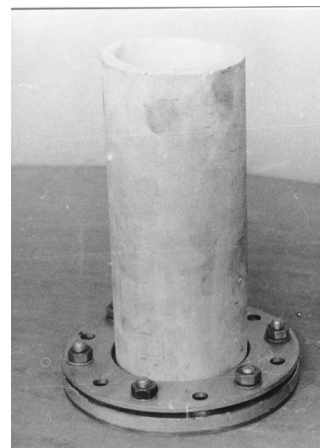


Рисунок 4 - Общий вид ЭП 14

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 ЭП может достигаться за счет использования принудительного охлаждения элементов пушки.

Основные параметры пушки:

- ускоряющее напряжение - $U \leq 100 \text{ кВ}$;
- длительность импульса - $\tau_u \leq 5 \cdot 10^{-6} \text{ с}$;
- частота следования - $f_c \leq 200 \text{ Гц}$
- диаметр электронного пучка - $d_A = 0,008 \text{ м}$;
- габаритные размеры – диаметр основания - $d = 180 \text{ мм}$, высота - $h = 200 \text{ мм}$.

- мощность электронного пучка в импульсе - $P_u \leq 10^6 \text{ Вт}$;
- средняя мощность - $P_{cp} \approx 10^3 \text{ Вт}$
- время непрерывной работы - $t_p \leq 0,5 \text{ час}$.

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 $d_k = 8 \text{ мм}$; диаметр анодного отверстия – $d_A = 9 \text{ мм}$; между-электродное расстояние $L_{AK} = 1 \text{ мм}$. 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

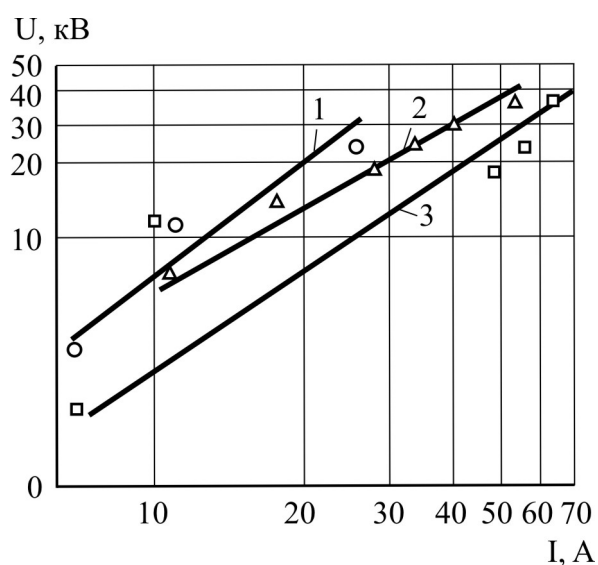


Рисунок 5 - Вольт-амперные характеристики газоразрядной электронной пушки ЭГП-6 в импульсном режиме работы

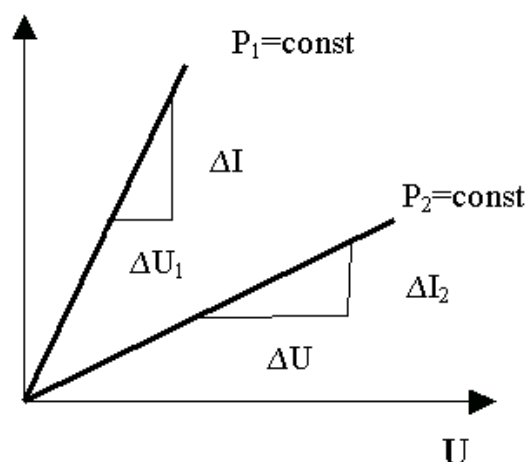


Рисунок 6 - Типовые вольт-амперные характеристики газоразрядной электронной пушки

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 ЭПП 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

$$S_2 = \frac{\Delta I_2}{\Delta U_2} > S_1 = \frac{\Delta I_1}{\Delta U_1} \quad \text{для} \quad P_2 > P_1.$$

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 ЭПП-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.

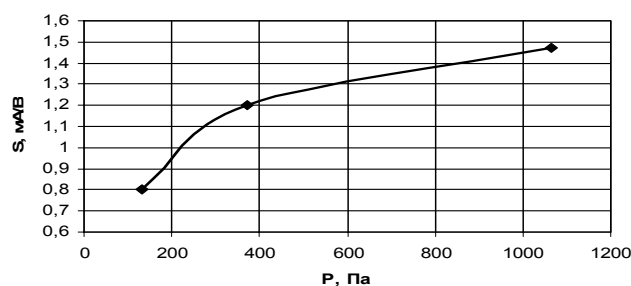


Рисунок 7 - Зависимость крутизны S импульсных вольт-амперных характеристик ЭПП-6 от давления P гелия

Проводились исследования вольт-амперных характеристик ЭПП-6 в непрерывном режиме. На рис.9 приведены экспериментальные зависимости

$I_n = f(U_n)$, измеренные при различных $P=const$ гелия и $L_{AK} = 1\text{ мм}$, $d_A=8\text{ мм}$. построенные в двойном логарифмическом масштабе, а на рис.10 – изменение крутизны S .

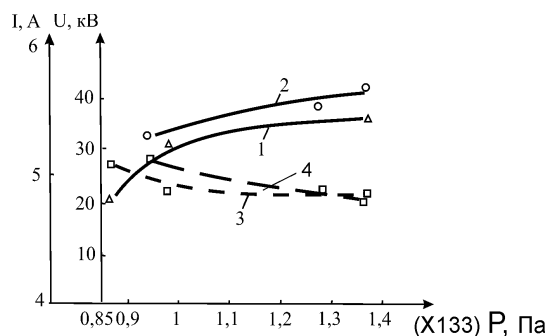


Рисунок 8 - Семейство экспериментальных характеристик ЭП-6 в импульсном режиме работы зависимости ускоряющего напряжения U_u и тока I_u от давления P и междуэлектродного расстояния L_{AK} , где кривая 1 описывает $I_u = f(P, L_{AK})$ для $L_{AK} = 2\text{ мм}$; 2- $I_u = f(P, L_{AK})$ для $L_{AK} = 4\text{ мм}$; 3- $U_u = f(P, L_{AK})$ для $L_{AK} = 2\text{ мм}$; 4- $U_u = f(P, L_{AK})$ для $L_{AK} = 4\text{ мм}$.

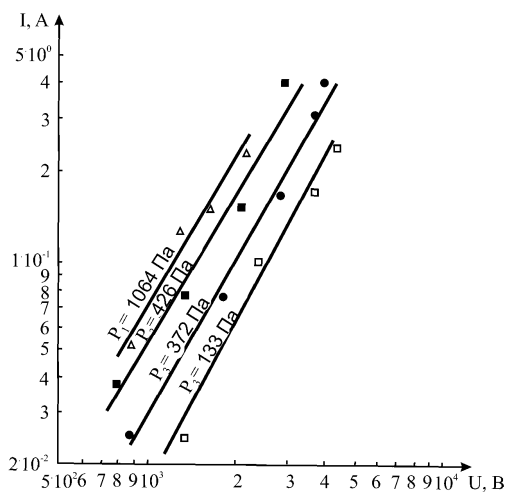


Рисунок 9 - Экспериментальные вольт – амперные характеристики ЭП-6 в непрерывном режиме

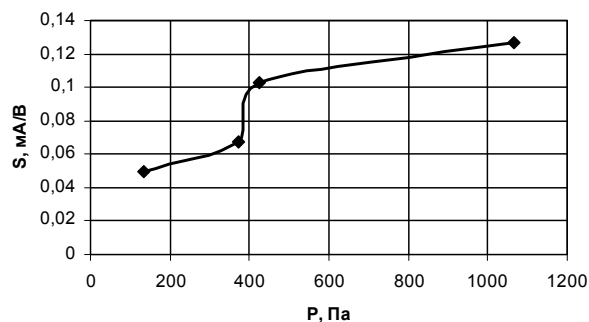


Рисунок 10 - Изменение крутизны S вольт-амперных характеристик ЭП-6 в непрерывном режиме

Как показано на рис.6 повышение давления приводит к росту крутизны S вольт-амперных характеристик ЭП-6 или уменьшению динамического сопротивления ЭП $R_d = \Delta U / \Delta I$. Статическое сопротивление ЭП-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 ЭП в импульсном режиме.

Экспериментальная вольт-амперная характеристика высоковольтной ЭГП-14 (рис.11) измерены при поддуве гелия; $\tau_u \leq 5 \cdot 10^{-6} \text{ с}$; $f_c \leq 200 \text{ Гц}$; $P_{cp} \approx 10^3 \text{ Вт}$; $P_u \leq 10^6 \text{ Вт}$.

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.

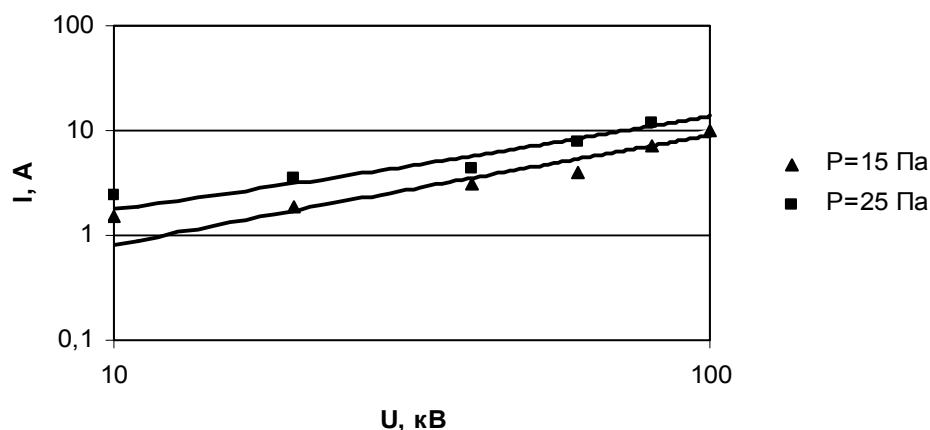


Рисунок 11 - Экспериментальные вольт-амперные характеристики высоковольтной газоразрядной электронной пушки ЭГП-14 в импульсном режиме

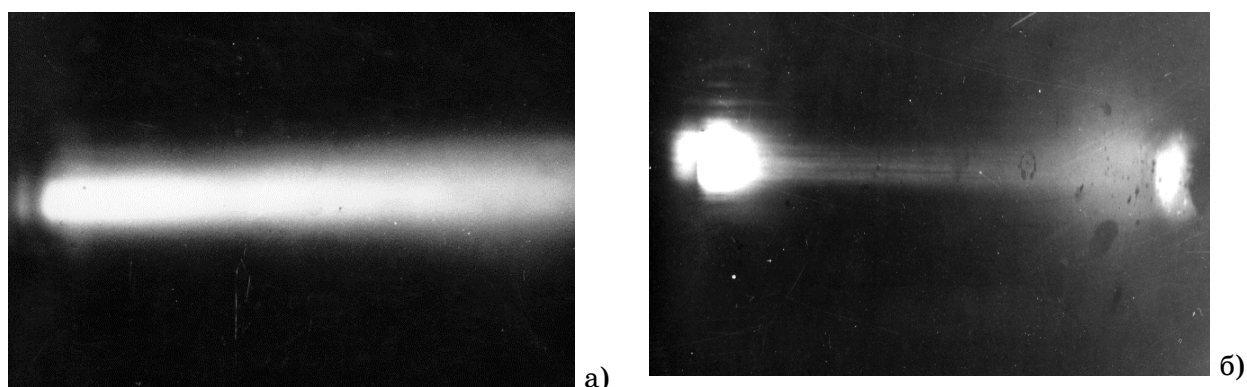


Рисунок 12 - Фотографии траектории электронного пучка

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 ЭП-6 и ЭП-14 для визуализации сложных газовых течений в диапазоне давлений ниже $P < 1200 \text{ Па}$, при ускоряющих напряжениях $U_u < 100 \text{ кВ}$. Максимальная мощность инжектируемого электронного пучка в импульсе составляла $N_u \leq 10^6 \text{ Вт}$.

Созданные ЭП представляют также практический интерес для реализации различных низковакуумных электронно-лучевых технологических процессов.

ЛИТЕРАТУРА

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. 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. 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. Нестерихин Ю.Е., Солоухин Р.И. Методы скоростных измерений в газодинамике и физике плазмы. М. Наука, 1971 , 239 с.
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 осьюою і радіальною координатах, результати можуть суттєво відрізнятися. В околі краю валка, де стан є неодномірним за осьюою і радіальною координатах, для розрахунків температурного напружено-деформованого 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

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 термоупругопластичности. Основной задачей нестационарной теории термоупругопластичности является определение перемещений (скоростей перемещений) и компонент тензоров напряжений и деформаций, возникающих в пространственном теле в процессе его нагружения, 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 $\vec{K}(\alpha^i, t)$, действующие 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 теплопроводности.

При решении нестационарной задачи теории пластичности в тех частях тела, где возникают необратимые деформации, будем пользоваться определяющими уравнениями, описывающими процессы нагружения как по прямолинейным траекториям, так и по траекториям деформирования малой кривизны. Здесь используется форма физических уравнений, приведенная в монографии [3].

Полная система уравнений в общем случае имеет вид [3-4]

$$\frac{\partial \vec{W}}{\partial t} = A_1 \frac{\partial \vec{W}}{\partial \alpha} + A_2 \frac{\partial \vec{W}}{\partial \beta} + A_3 \frac{\partial \vec{W}}{\partial \gamma} + \vec{B}, \quad (1)$$

где $\vec{W}$ - вектор, компонентами которого будут скорости перемещений 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 деформируемого твердого тела, имеет вид

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{a}{H_1 H_2 H_3} \left[\frac{\partial}{\partial \alpha} \left(\frac{H_2 H_3}{H_1} \frac{\partial T}{\partial \alpha} \right) + \frac{\partial}{\partial \beta} \left(\frac{H_1 H_3}{H_2} \frac{\partial T}{\partial \beta} \right) + \frac{\partial}{\partial \gamma} \left(\frac{H_1 H_2}{H_3} \frac{\partial T}{\partial \gamma} \right) + \frac{W_*}{\lambda} \right], \quad (2)$$

где

$$W_* = S_{ij} \dot{\gamma}_{ij} - \frac{S_{ij} \dot{S}_{ij}}{2G} + \frac{\sigma_{ij}}{3} (\dot{\varepsilon}_{ij} - 3\alpha \dot{T}) - \frac{\sigma_{ii} \dot{\sigma}_{ii}}{9K}, \quad (3)$$

$$S_{ij} = \sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma, \quad \dot{\gamma}_{ij} = \varepsilon_{ij} - \delta_{ij} \varepsilon, \quad \sigma = \frac{\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}}{3}, \quad \varepsilon = \frac{\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}}{3},$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}, \quad K = \frac{E}{1-2\nu},$$

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, φ, 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

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left[\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right] + \frac{a W_*}{\lambda r}. \quad (4)$$

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

$$T = \frac{2q\sqrt{t}}{\sqrt{\pi\lambda c\rho}} \left\{ e^{-\frac{x^2}{4a\tau}} - \sqrt{\pi} \frac{x}{2\sqrt{at}} \left[1 - O\left(\frac{\delta}{2\sqrt{at}}\right) \right] \right\}, \quad (5)$$

где T – температура, $^{\circ}\text{C}$; 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

$$\sigma_z = \frac{E\alpha}{1-\mu} \left(\frac{2}{R^2 - r_0^2} \int_{r_0}^R T r dr - T \right); \quad (6)$$

$$\sigma_t = \frac{E\alpha}{1-\mu} \left(\frac{1}{r^2} \int_0^r T r dr + \frac{r^2 + r_0^2}{r^2 (R^2 - r_0^2)} \int_0^R T r dr - T \right); \quad (7)$$

$$\sigma_r = \frac{E\alpha}{1-\mu} \left(-\frac{1}{r^2} \int_{r_0}^R T r dr + \frac{r^2 + r_0^2}{r^2 (R^2 - r_0^2)} \int_{r_0}^R T r dr - T \right); \quad (8)$$

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°C . При установившемся режиме прокатки температура поверхности валка не превышает 300°C .

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

$$\omega_r = \{ t_p; t_{p+1} = t_p + \tau; t_0 = 0; p = 0, 1, 2, \dots \}, \quad (9)$$

$$\omega_h = \left\{ r_i, \varphi_j, x_k; r_{i+1} = r_i + h_1; \varphi_{j+1} = \varphi_j + h_\varphi; x_{k+1} = x_k + h_3; \right. \\ \left. i = 0, 1, \dots, N_1; j = 0, 1, \dots, N_2; k = 0, 1, \dots, N_3. \right\}. \quad (10)$$

Неявная разностная схема в произвольном узле r_i, φ_j, x_k выглядит так

$$\frac{T^{p+1/3} - T^p}{\tau} = \frac{a}{h_1^2} \left[\alpha \left(\mu_1(T^{p+1}) + \frac{h_1}{r_i} \lambda_1(T^{p+1}) \right) + \beta \left(\mu_1(T^p) + \frac{h_1}{r_i} \lambda_1(T^p) \right) \right] + \\ + \frac{a}{r_i^2 h_\varphi^2} [\alpha \mu_2(T^{p+1}) + \beta \mu_2(T^p)] + \frac{a}{h_3^2} [\alpha \mu_3(T^{p+1}) + \beta \mu_3(T^p)] + \frac{W_*^p(r_i, \varphi_j, x_k)}{\rho c r_i}. \quad (11)$$

Здесь $\alpha + \beta = 1$, λ_n, μ_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

$$T^{p+1} = T^p + \tau a \left\{ \frac{1}{h_1^2} \left(\mu_1(T^p) + \frac{h_1}{r_i} \lambda_1(T^p) \right) + \frac{\mu_2(T^p)}{r_i^2 h_\varphi^2} + \frac{\mu_3(T^p)}{h_3^2} \right\} + \tau \frac{W_*^p(r_i, \varphi_j, x_k)}{\rho c r_i}. \quad (12)$$

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

$$\frac{W_m^{p+1} - W_m^p}{\tau} = \alpha (\Lambda_1 W_m + \Lambda_2 W_m + \Lambda_3 W_m)^{p+1} + \beta (\Lambda_1 W_m + \Lambda_2 W_m + \Lambda_3 W_m)^p + B_m^p. \quad (13)$$

Здесь $\alpha + \beta = 1$, а также введены обозначения для дифференциального оператора первого порядка $\Lambda_s W_m \equiv A_s \frac{\partial W_m}{\partial \alpha_s}, s = 1, 2, 3$. Суммирование по s не ведется [4].

В случае применения явной схемы ($\alpha = 0, \beta = 1$) из (13) получим

$$W_m^{p+1} = W_m^p + \tau (\Lambda_1 W_m + \Lambda_2 W_m + \Lambda_3 W_m)^p + \tau B_m^p. \quad (14)$$

Для случая осесимметричного состояния тела при использовании схемы Кранка-Николсона ($\alpha = \beta = 0,5$), формулы (13), (14) переписываются так

$$W_m^{p+1} = W_m^p + \tau (\Lambda_1 W_m + \Lambda_3 W_m)^p + \tau B_m^p, \quad (15)$$

$$(W_m)_{n+1}^{p+1} = W_m^p + \frac{\tau}{2} \left\{ (\Lambda_1 W_m + \Lambda_3 W_m)_n^{p+1} + (\Lambda_1 W_m + \Lambda_3 W_m)^p + 2B_m^p \right\}. \quad (16)$$

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.

$$\omega_r = \{t_p; t_{p+1/2} = t_p + \tau_1; t_{p+1} = t_{p+1/2} + \tau_2; \tau = \tau_1 + \tau_2; t_0 = 0, p = 0, 1, 2, \dots\}$$

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

$$\frac{\partial \vec{W}}{\partial t} = A_1 \frac{\partial \vec{W}}{\partial r} + \phi_1 \vec{B}, \quad t \in [t_p, t_{p+1/2}], \quad \frac{\partial \vec{W}}{\partial t} = A_3 \frac{\partial \vec{W}}{\partial z} + \phi_2 \vec{B}, \quad t \in [t_{p+1/2}, t_{p+1}], \quad (17)$$

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

$$\begin{aligned} \frac{1}{\tau} (\vec{W}^{p+1/2} - \vec{W}^p) &= \alpha \Lambda_1 \vec{W}^{p+1/2} + \beta \Lambda_1 \vec{W}^p + \phi_1 \vec{B}^p, \\ \frac{1}{\tau} (\vec{W}^{p+1} - \vec{W}^{p+1/2}) &= \alpha \Lambda_3 \vec{W}^{p+1} + \beta \Lambda_3 \vec{W}^{p+1/2} + \phi_2 \vec{B}^{p+1/2}, \end{aligned} \quad (18)$$

где $\alpha + \beta = 1$, а дифференциальные операторы $\Lambda_n \vec{W}$ вводятся следующим образом $\Lambda_1 \vec{W} = \frac{A_1}{h_1} \cdot \lambda_1(\vec{W})$, $\Lambda_3 \vec{W} = \frac{A_3}{h_3} \cdot \lambda_3(\vec{W})$, $n = 1, 2$.

Здесь $\lambda_n(\dots)$ – 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 отличие от двух предыдущих схем первого порядка имеет второй порядок аппроксимации

по времени. Решение системы (18) предлагается строить при помощи следующей итерационной процедуры

$$(\vec{W}^{p+1/2})_{i+1} = \vec{W}^p + \tau \frac{A_1}{h_1} \{ \alpha \lambda_1(\vec{W}^{p+1/2})_i + \beta \lambda_1(\vec{W}^p) \} + \tau \phi \vec{B}^p, \quad (19)$$

$$(\vec{W}^{p+1})_{j+1} = \vec{W}^{p+1/2} + \tau \frac{A_3}{h_3} \{ \alpha \lambda_3(\vec{W}^{p+1})_j + \beta \lambda_3(\vec{W}^{p+1/2}) \} + \tau \phi \vec{B}^{p+1/2}. \quad (20)$$

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 $\lambda_n(\dots)$, 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 вала 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 $t = n\tau_*$ ($n = 0; 1; \dots$). Полученные результаты позволили сравнить вычислительную эффективность примененных методов расчета и сделать такие выводы.

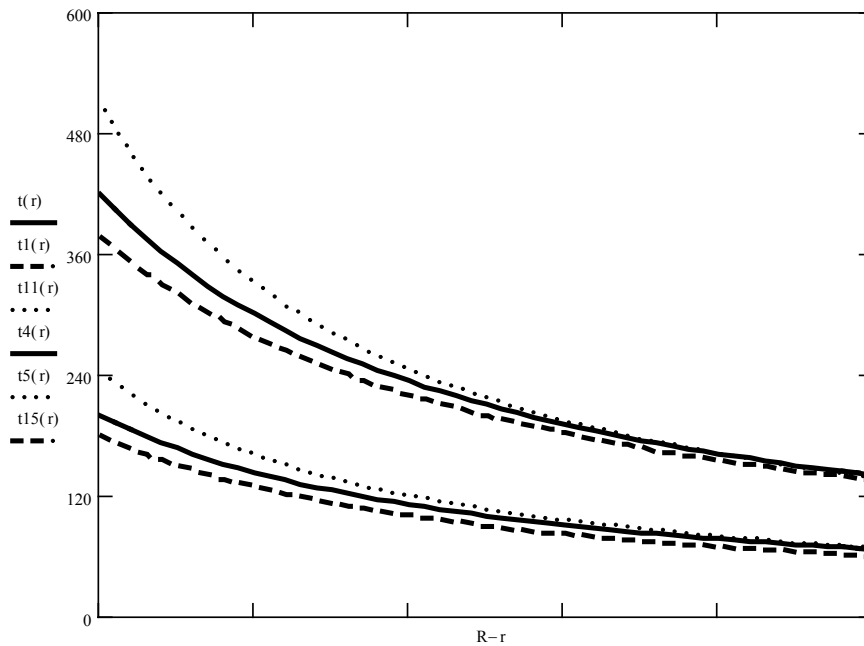


Рисунок 1

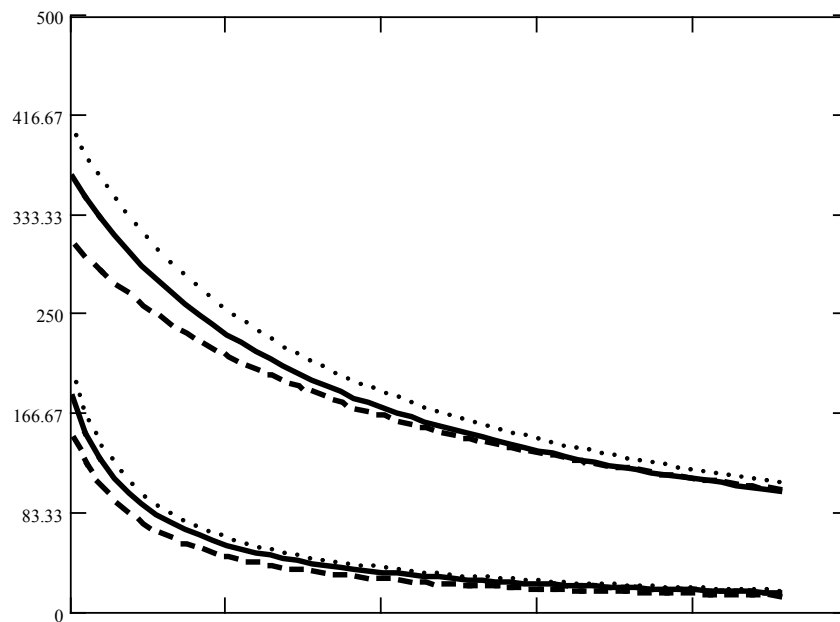


Рисунок 2

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°C .

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 середины валка, а по мере приближения к краю, где состояние является заведомо неоднородным по осевой и радиальной координатам, результаты могут существенно отличаться. 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 нестационарній 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.