

УДК 669.162.266

А.А. Ванюков, Н.Д. Ванюкова, А.А. Дядин

ВЛИЯНИЕ ПРОЦЕССОВ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО НАГРЕВА НА ПРОЦЕСС ВОССТАНОВЛЕНИЯ САМОВОССТАНАВЛИВАЮЩИХСЯ БЕЗОБЖИГОВЫХ ОКАТЫШЕЙ (СВО).

Исследован процесс восстановления СВО в интервале температур 650-950°С. Проба СВО отобрана из промышленной партии, произведенной из смеси шламов доменного и конвертерного производств с добавкой портландцемента в качестве связующего вещества, путем окомкования на чашевом грануляторе. Были получены гранулы размером 10-20 мм. Установлено, что уже при температуре 750-800°С степень восстановления составляет около 11 %, а прочность СВО снижается с 55 кг/ок до 10-12 кг/ок. Восстановление СВО происходит прямым путем за счет углерода, содержащегося в СВО, который поступает в шихту из доменных шламов.

Ключевые слова: шламы; самовосстанавливающиеся окатыши; углерод; прямое восстановление; прочность.

Досліджено процес відновлення СВО в інтервалі температур 650-950 ° С. Проба СВО відібрана з промислової партії СВО, вироблених на чашевому грануляторі діаметром 5,5 м із шихти, що включає доменні шлами, які містять близько 10% вуглецю, конвертерні шлами і близько 10% в'язучого - портландцементу. Встановлено механізм низькотемпературного відновлення СВО, який полягає в тому, що завдяки тісному контакту вуглецю і оксидів заліза ініціюється процес прямого відновлення заліза з утворенням газу СО, а також у результаті реакції газифікації вуглецю підвищується тиск газу-відновника (СО) і газ переміщується до центру СВО, де проводить попереднє відновлення до підходу високотемпературної зони.

Ключові слова: шлами; самовідновлювальні обкотиші; вуглець; пряме відновлення; міцність. Бібл.8, табл.1.

The fundamental reactions occurring during the heat treatment of cold bonded pellets comprised of the blast furnace and steelmaking by-products have been studied. Blast furnace sludge, which contains fractions of coke particles, have been included in the self reducing (SRP) blend as a source of solid reductant. Results from this investigation demonstrate that the decomposition of hydrates in SRP samples contribute as a gaseous intermediates to an earlier reduction of contained iron oxides. The gaseous intermediates are responsible for an initial gasification of carbon contained in blast furnace sludge leading to low temperature (~750°C) iron oxides reduction. SRP with 10-20 mm diameter were submitted to different temperature and a degree of reduction for evaluating a strength and a degree of reduction. The strength of 55 kg/pellet at room temperature decreased to 10 - 12 kg/pellet after submitted to reduction that corresponds to 750 - 850°C.

Key words: self reducing pellets (SRP), direct reduction, heating carbon, strength.

Состояние вопроса

СВО были получены из шламов доменного и сталеплавильного производств с добавлением портландцемента в качестве связующего вещества. Полученная шихта смешивалась, подсушивалась и окомковывалась на чашевом грануляторе диаметром 5,5 м. Полученные

гранулы выдерживались на воздухе в течение 28 суток для набора прочности. Основное преимущество СВО связано со скоростью восстановления. Благодаря тесному контакту оксидов железа с углеродом и малым размером их частиц полное восстановление может быть достигнуто за период времени от 5 до 10 мин в интервале температур 1000-1200°C [1]. Это согласуется с результатами более ранних исследований [2-5].

Цель работы

Целью настоящей работы является исследование процесса восстановления СВО в интервале температур 650-950°C. Интервал температур выбран с учетом того, что температура начала прямого восстановления частиц оксидов железа с углеродом составляет ~ 700°C. Экспериментально доказано, что при тесном контакте углерода с оксидами железа развивается реакция прямого восстановления в интервале температур 700-850°C по двухзвенной схеме, т.е. с реакцией газификации углерода [6]. Таким образом, имеют практическое значение степень развития процессов восстановления и прочности СВО в этом диапазоне температур.

Методика исследования. Химический состав СВО включал: Fe_{об}–43,1%; FeO–10%; Fe₂O –50,48%; CaO–17,3%; MgO–0,58%; C–8,7%.

Прочность на сжатие определяли на разрывной машине МИИ-100. Исследовали фракции СВО мм: (10-12); (12-15) и (15-20). В каждой из групп фракций интервал между диаметрами исследованных окатышей составлял 1 мм (10; 11; 12), (13; 14; 15) и (16; 17; 18; 19; 20).

Исследование процесса восстановления. Для исследования процессов восстановления за счет твердого углерода, содержащегося в СВО, использовали муфельную печь. Температуру изменяли в интервале 650 - 950°C. Пробу СВО (50г) загружали в графитовый тигель. Дно тигля и загруженную пробу засыпали коксом. Кокс массой 20 г использовали для создания слабовосстановительной атмосферы в тигле. Исследуемой фракцией заполняли шесть тиглей (по числу исследуемых температур). Все тигли одновременно помещали в муфельную печь и извлекали поочередно при достижении заданных температур 650; 750; 850; 900; 930; 950°C. По окончании времени выдержки тигля проба охлаждалась под слоем кокса примерно 2 часа. Продолжительность времени выдержки проб в интервале температур: 650-900°C составляла по 30 мин, а в интервале температур 900-950°C - 16мин.

После высокотемпературной обработки из полученной пробы отбирали по 5 окатышей для определения прочности после восстановления. По результатам взвешивания определяли потерю массы и рассчитывали степень восстановления: Δm_1 – потеря массы окатышей; m_c – потеря массы углерода (принимая, что весь углерод окатышей (8,7%) был использован для восстановления);

$m_{O_2(вост)}$ – масса кислорода оксидов железа отнятого углеродом ($m_{O_2(вост)} = \Delta m_1 - m_C$). Содержание кислорода (O_2) в оксидах железа исходной пробы $m_{O_2(исх)} = 12,9г$. Степень восстановления

рассчитывали по формуле: $\eta = \frac{m_{O_2(вост)}}{m_{O_2(исх)}} \cdot 100\%$.

Результаты исследования

Показатели степени восстановления приведены в таблице 1. Следует отметить, что уже при температуре 650-750°C степень восстановления для фракций 10-12 мм составила 12,4%, а для фракции 15-20 мм – 8-17%.

С увеличением размера окатыша прочность возрастает прямопропорционально. Наиболее прочные СВО соответствуют фракции 20 мм.

Холодная прочность СВО (кг/ок) для исследуемых размеров приведена ниже.

Размер СВО (мм)	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Средн.
Прочность, кг/ок	40,8	40,8	33,2	21,8	32,8	42,2	54,8	61,6	67,8	60	76,8	55,0

Таблица 1

Результаты восстановления СВО в интервале температур 650-950°C

Температура °C	Размер СВО		
	10-12 (мм)	12-15 (мм)	15-20 (мм)
	Степень восстановления, %		
950	37,7	50,7	83,7
900	32,1	27,5	83,7
850	-	25,3	35,3
750	12,40	5,3	17,05
650	12,40	2,3	8,0

Анализ степени восстановления СВО в интервале температур 650 - 950°C показывает, что с увеличением уровня нагрева степень восстановления повышается. При температуре 950°C степень восстановления возрастет с увеличением размера фракции

от 37,7% до 83,7%. Причем такое же значение степени восстановления соответствует температуре 900°C. Это свидетельствует о том, что к этому моменту углерод, находящийся в структуре окатышей фракции 15–20 мм, по-видимому, весь вступил в реакцию и максимальная степень восстановления за счет твердого углерода составила 83,7%. При температурах 650 - 750°C также произошло восстановление.

Для этого интервала температур степень восстановления в среднем составила 12,4%.

Аналогичные результаты получены проф. Г.В. Губиным [6] так, при восстановлении рудугольных окатышей при 800°C в токе азота (степень восстановления составила 11,5%). Из данных, что приведены, следует, что уже в интервалах температур 700-800°C в середине окатыша происходят процессы восстановления.

С увеличением степени восстановления до 20 – 30% прочность СВО снижается до 10–12кг/ок, а затем при температуре 850°C и степени восстановления более 30% прочность окатышей увеличивается. При 950°C прочность составила 25,4 кг/ок. После восстановления СВО не растрескивались и не разрушались.

Обсуждение экспериментальных данных

Одним из важных научных результатов проведенного исследования является экспериментально установленный факт, что при одной и той же температуре в диапазоне 650-950°C и продолжительности выдержки степень восстановления в окатышах большого размера (около 20мм) значительно выше, чем в СВО меньшего размера.

Особенностью процесса восстановления СВО является содержание в них тонкодисперсного углерода, в нашем случае коксика, и его тесный контакт с оксидами железа. При нагреве системы происходит эндотермическая реакция прямого восстановления железа и газификации углерода. Так как безобжиговые СВО упрочняются за счет цемента в результате его гидратации с образованием гидросиликатов кальция, то в связке присутствует влага. Влага окатышей - капиллярная и составляет 1,6 – 2,0%, она удаляется при температуре 100 -200°C. Химически связанная вода гидросиликатов кальция при расходе портландцемента 8 – 12% составляет около 2,5% по массе и начинает удаляться в интервале температур 300 - 500°C. Следует учитывать, что прогрев окатышей от поверхности к центру происходит в течение определенного времени. Так в окатыше размером 20мм, температура поверхности которого 1000°C, эта температура достигает центра СВО через 3–3,5 мин [7].

Поэтому, когда поверхность СВО и углерод разогреты вместе из центра СВО поступают пары воды и инициируют газификацию углерода в приповерхностном слое: $C + H_2O \rightarrow CO + H_2$. За счет тесного контакта тонкодисперсного углерода с оксидами железа при температурах 700 - 800°C начинается прямое восстановление ($FeO + C = Fe + CO$). Приведенные условия создают концентрацию газа – восстановителя (CO),

который движется к центру по градиенту температуры и производит восстановительную работу. Этому способствует также реакция газификации углерода ($C + CO_2 = 2CO$). Образующиеся две молекулы CO создают в месте, где протекает эта реакция, повышенное давление газа и он, передвигаясь к центру, производит предварительное восстановление до подхода высокотемпературной зоны восстановления [8].

Выводы

1. Установлен механизм восстановления в самовосстанавливающихся окатышах в интервале температур 650 - 950°C, заключающийся в том, что при температуре 700 - 750°C благодаря тесному контакту углерода с оксидами железа начинается процесс прямого восстановления железа ($FeO + C = Fe + CO$) с образованием газа – восстановителя CO. В это же время происходит прогрев окатыша по направлению к центру и при 500 - 600°C начинает удаляться влага гидросиликатов (~2,5% по массе) пары которой инициируют раннюю газификацию углерода в приповерхностных слоях окатыша, где возрастает давление газа. Он перемещается к центру и производит предварительное восстановление до подхода высокотемпературной зоны.

2. Установлено снижение прочности самовосстанавливающихся окатышей в интервале 650 - 750°C. Одна из основных причин снижения прочности дегидратация силикатов кальция, являющихся основной связкой окатышей, полученных при использовании портландцемента.

ЛИТЕРАТУРА

1. Эффективность применения гранулированного углеродсодержащего железобоксита в доменной плавке /Д.А. Ковалев; Б.П. Крикунов, А.А. Ванюков и др // ОАО «Черметинформация» - Бюллетень «Черная металлургия – 2012 - №7 – с. 49 -54.
2. Simonov V.K., Rudenko L.N. Kinetics of separative and integrated iron ore reduction with gases and solid carbon // Diffusion and chemical aspects. – М: Nauka – 1980 – р. – 36 – 51.
3. Huand B., Lu W. - K. Kinetics and mechanism in iron ore/coal composites.// Iron and still institute of Japan intertational. – 1993 (v.33) - № 10 – pp. 1055-1061.
4. Ковалев Д.А., Ванюкова Н.Д., Ванюков А.А. / Исследование металлургических свойств самовосстанавливающихся окатышей // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2013 -№4 – с.7–9.
5. Robinson R. High temperature properties of by-product cold bonded pellets containing blast furnace flue dust // Thermo chemical Acta – vol 432 (2005) – pp 112-123/
6. Kashiwaya Y., Kanbe M., Ishii K. Reaction Behavior of Facing Pair between Hematite and Graphite: A Coupling Phenomenon of Reduction and Gasification.//ISIJ International, vol. 41(2001), №8, p.p.818-826.
7. Губін Г.В., Півець В.О. Сучасні промислові способи безкоксової металургії заліза/ Кривий Піг – 2010 – 336с.
8. Ueki Y., Maeda T., Shimizu M. Effect of Atmospheric Gas Composition on Reaction Behavior of Low Porosity Carbon Composite Iron Ore Pellet.//Tetsu-to-Hagane, vol.89 (2003), №12, p.p.1205-1211.

ВЗАИМОСВЯЗЬ ФРАКТАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕТАЛЛОСТРУКТУР И ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИИ

В статье рассматриваются поверхности различных металлоструктур и изменение их фрактальной размерности в зависимости от состава и параметров технологии. Построены эмпирические распределения локальных фрактальных размерностей структур.

Ключевые слова: металлоструктура, фрактальный анализ, фрактальные характеристики, фрактальная размерность, фрактальные распределения.

У статті розглядаються поверхні різних металоструктур та зміна їх фрактальної розмірності в залежності від складу і параметрів технології. Побудовані емпіричні розподілення локальних фрактальних розмірностей структур.

The article discusses various surface metallostructure and changing their fractal dimension depending on the composition and technology parameters. Constructed empirical distribution of local fractal dimensions structures.

Введение. Скейлинговое свойство фрактальных объектов обеспечивает постоянство их основных геометрических особенностей при изменении масштаба. К объектам, которые характеризуются фрактальными свойствами, можно отнести и различные металлоструктуры [2]. В этой связи представляет интерес исследование фрактальными методами поведения структур прокатной ленты и литых сплавов при изменении состава и параметров технологии.

Целью данной работы является анализ фрактальных характеристик поверхностей металлоструктур в зависимости от состава и параметров технологии.

Материалы и методики исследования. В процессе исследования анализировались фотографии структуры прокатной ленты в день получения и после искусственного старения (рисунок 1); фотографии структуры тонкой ленты с различным содержанием бария (рисунок 2); фотографии структур литых сплавов с различным составом (рисунок 3).

В процессе исследований фрактальная размерность микроструктур определялась методом BOX COUNTING [1], который может быть применен к изображениям различной структуры. Для построения фрактальных распределений использовался метод скользящего окна [1].

Прокатное производство служит не только для получения нужной формы изделия, но и для формирования у него определенной структуры и свойств. Одним из методов получения прокатной ленты с определенными свойствами и структурой является использование старения материалов – медленное самопроизвольное необратимое изменение свойств материалов.

Старение происходит под действием теплового движения молекул и атомов, светового и иного излучения, механических воздействий, гравитационных и магнитных полей и других факторов. В результате материал переходит в более равновесное состояние [2]. Поэтому представляет интерес исследование структуры прокатной ленты непосредственно с день получения (старение 0 часов) и после старения 2800 часов (рисунок 1 а, б).

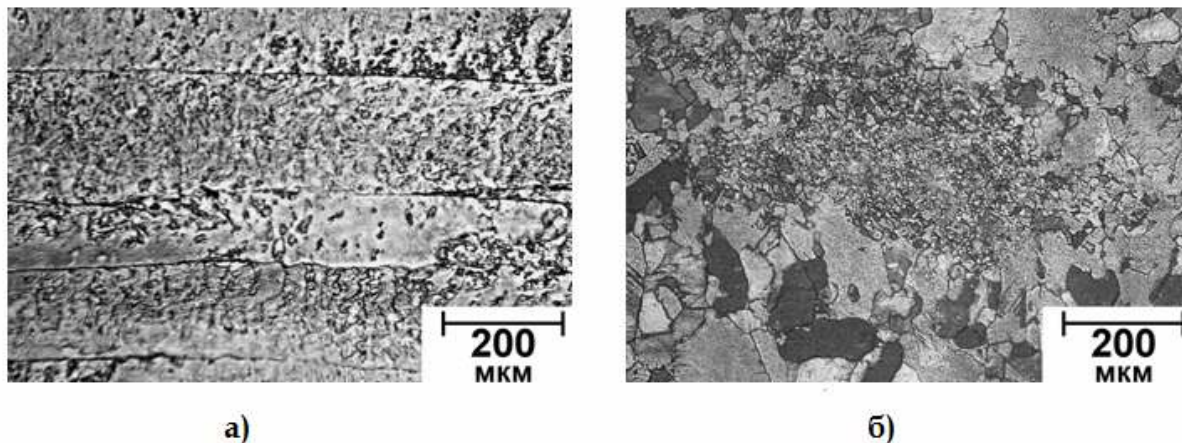


Рисунок 1. – Изображения структуры прокатной ленты, степень деформации 94%, масштаб 200 мкм:

а) время старения – 0 часов; б) время старения – 2800 часов

Существенное влияние на структуру материалов оказывает состав. В связи с этим имеет смысл исследовать структуру тонкой ленты с различным содержанием бария, который существенно влияет на структуру материала за счет уменьшения размеров неметаллических включений и измельчения первичного зерна литого металла (рисунок 2 а, б). Также в работе проведены исследования структур литых сплавов с различным количественным содержанием калия и олова (рисунок 3 а, б).

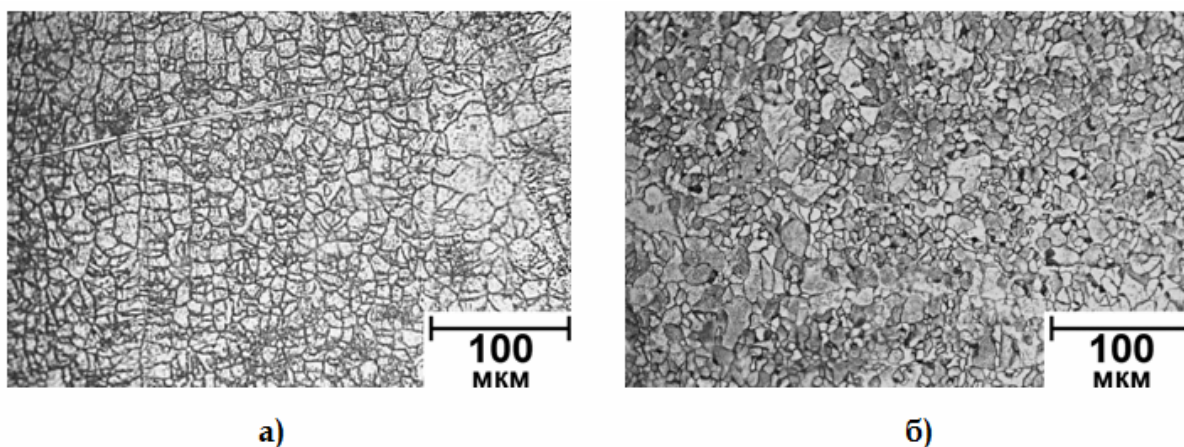
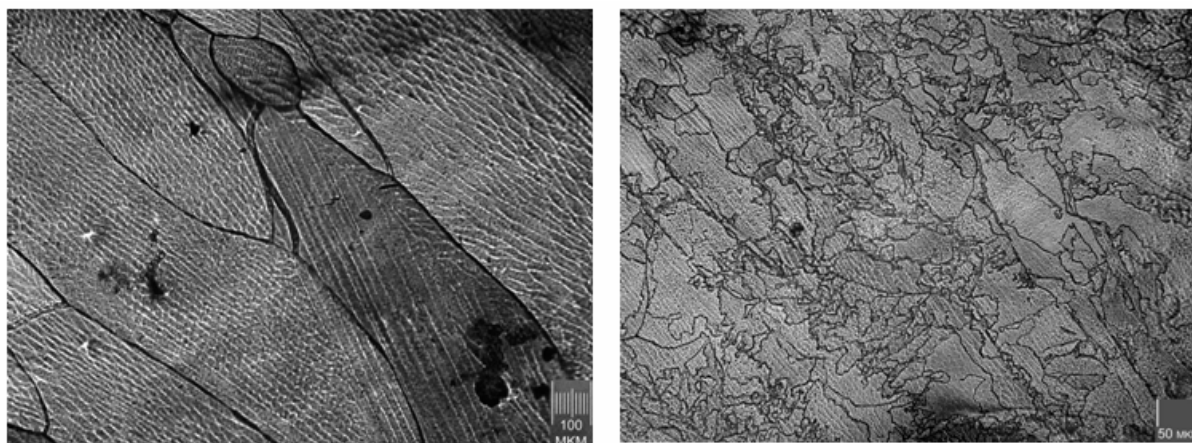


Рисунок 2. – Изображения структуры тонкой ленты из сплава, полученного с помощью охлаждения $10^4 K / c$, $t = 2800 c$:

а) 0.02%Ba; б) 0.03%Ba



а)

б)

Рисунок 3. – Литые сплавы:
а) Свинец + 0.5% Калий + 1.1% Олово;
б) Свинец + 1.1% Калий + 0.3% Олово

Результаты исследований и их обсуждение

В процессе проведения фрактального анализа изображений структуры прокатной ленты с различным временем старения, были получены значения фрактальной размерности и фрактальные распределения.

Фрактальные размерности изображений незначительно отличаются: для прокатной ленты с временем старения 0 часов, фрактальная размерность составляет 1.9759, а с временем старения 2800 часов - 1.9888. Согласно полученным результатам можно говорить о том, что данные изображения характеризуют один и тот же материал и выполнены в одном яркостном диапазоне [3].

Фрактальные распределения данных изображений имеют существенные качественные различия. Изображение, представленное на рисунке 1а, имеет мультимодальное распределение, т.е. имеет 4 моды, следовательно, 4 кластера (рисунок 4а). При этом фрактальное распределение изображения, представленного на рисунке 1б, является однородным (рисунок 4б). Это говорит о том, что качество материала улучшилось. Стоит отметить, что такие характеристики как предел прочности, текучести, твердость приведенного сплава находятся в окрестности своего максимума. Дальнейшая процедура старения приведет к перестариванию материала и снижению данных характеристик. Перестаривание можно увидеть также по фрактальному распределению – снова появятся моды.

В процессе проведения фрактального анализа структур тонкой ленты из сплава, полученных с помощью охлаждения $10^4 K / c$ с различным содержанием бария, были получены значения фрактальной размерности и фрактальные распределения.

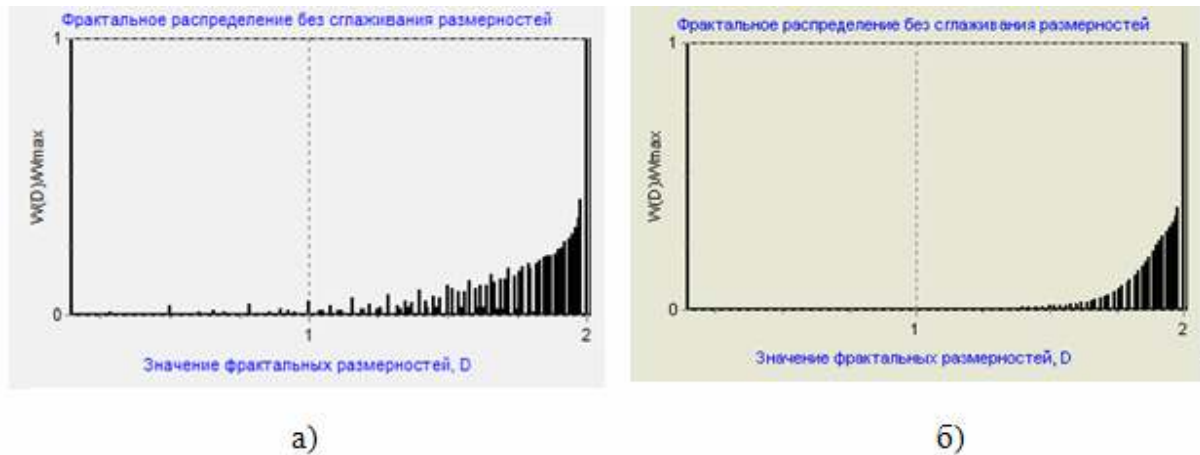


Рисунок 4. – Фрактальное распределение структуры прокатной ленты:
а) 0 часов старения; б) 2800 часов старения

Фрактальные размерности изображений незначительно отличаются друг от друга: для структуры, содержащей 0.02%Ba, фрактальная размерность составляет 1.9552, а структура, содержащая 0.03%Ba, имеет фрактальную размерность 1.9698. Поэтому можно говорить о том, что данные изображения характеризуют один и тот же материал и выполнены в одном яркостном диапазоне.

Фрактальные распределения изображений структур, представленных на рисунке 2, имеют качественные различия. Структура на рисунке 2а имеет мультимодальное распределение, состоящее из 5 мод (рисунок 5а). При этом фрактальное распределение структуры на рисунке 2б является более однородным и содержит всего лишь три моды (рисунок 5б). Это говорит о том, что качество материала улучшилось, но не является идеальным. Стоит отметить, что такие результаты показывают, что барий существенно влияет на структуру материала за счет уменьшения размеров неметаллических включений и измельчения первичного зерна литого металла, но при этом, вряд ли увеличение содержания бария сможет повысить качество сплава до максимально возможного. Таким образом, можно говорить, что барий в данном случае не показал качество эффективного раскислителя, но сыграл роль модификатора.

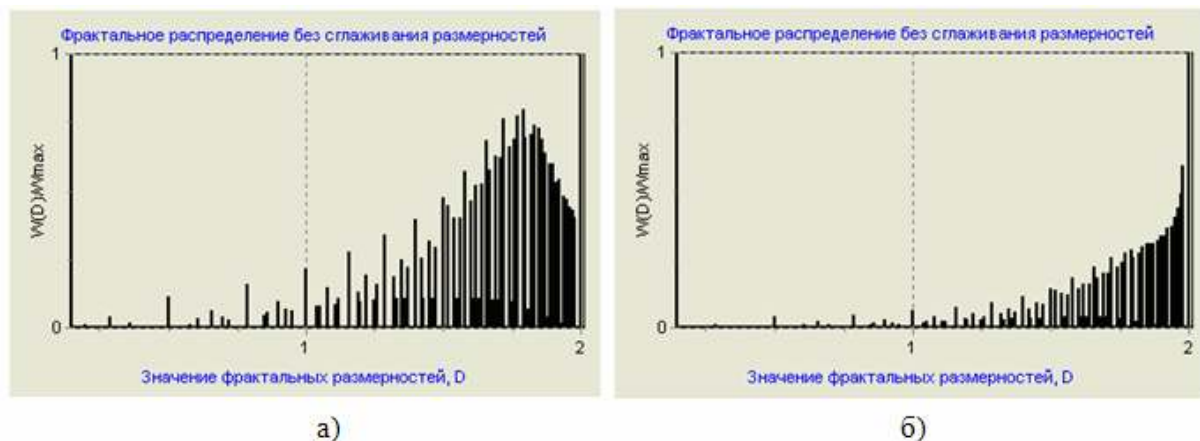


Рисунок 5. – Фрактальное распределение структуры тонкой ленты:
а) 0.02%Ba ; б) 0.03%Ba

В процессе проведения фрактального анализа структур литых сплавов с различным количественным составом, были получены значения фрактальной размерности и фрактальные распределения.

Фрактальная размерность данных изображений значительно отличается: для сплава с составом Свинец + 0.5% Калий + 1.1% Олово значение фрактальной размерности составляет 1.9604, а для сплава с составом Свинец + 1.1% Калий + 0.3% Олово, фрактальная размерность имеет значение 1.9306, что явно выражает разный состав сплавов.

Распределения для изображений, представленных на рисунке 3, показывают следующее: для сплава, представленного на рисунке 3а, распределение имеет более однородный характер, содержащее не более двух мод (рисунок 6а); для сплава, представленного на рисунке 3б – распределение имеет 3 моды (рисунок 6б). Это может свидетельствовать о различном масштабе. При этом при увеличении масштаба выявляется еще один вид кластера, на что указывает появившаяся третья мода распределения.

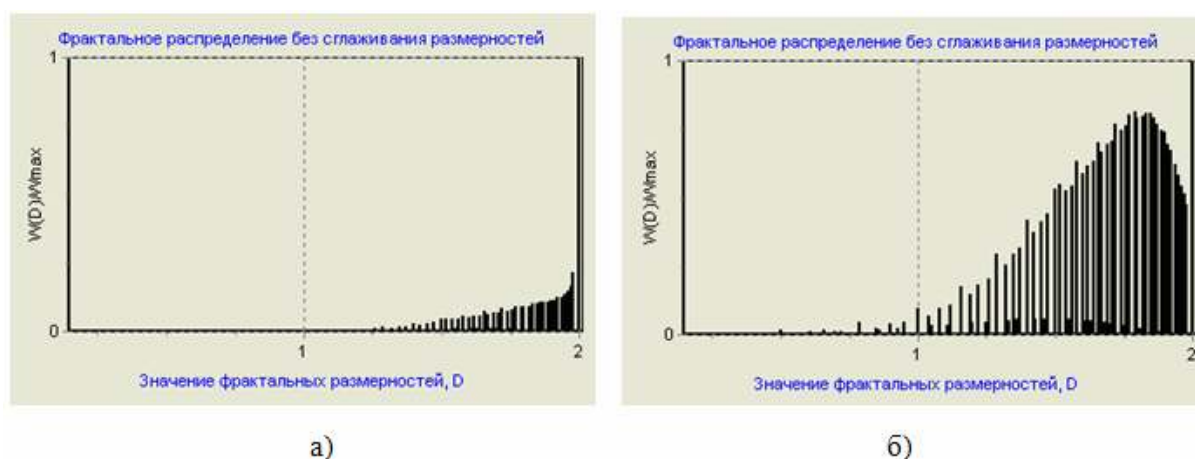


Рисунок 6. – Фрактальное распределение структуры литого сплава:
а) Свинец + 0.5% Калий + 1.1% Олово;
б) Свинец + 1.1% Калий + 0.3% Олово

Выводы

В данной работе исследовалось изменение фрактальных характеристик металлоструктур в зависимости от количественного и качественного состава сплавов и параметров технологии.

В работе оцениваются такие фрактальные характеристики как фрактальная размерность и фрактальное распределение.

Выявлено, что значение фрактальной размерности позволяет отследить изменения количественного состава сплава, а характер фрактального распределения – качественные изменения в структуре.

Незначительные колебания значений фрактальной размерности позволяют сделать вывод о том, что количественный состав исследуемых

структур не изменялся. Если же значения фрактальной размерности имеют значительные различия, то в данном случае можно сделать вывод о том, что количественный состав исследуемых структур изменялся.

Вычисление локальных фрактальных размерностей и построение фрактальных распределений дают мультимодальные распределения в случае содержания в структуре кластеров разных размеров. Однородные фрактальные распределения говорят об однородной структуре. Определено, что при изменении фрактального распределения от мультимодального к однородному, значительно улучшаются качественные характеристики структуры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Журба А.А. Анализ изменений фрактальной размерности и ее распределения в процессе формирования композитной структуры быстрорежущей стали / А.А. Журба, А.И. Михалёв, С.И. Губенко, Е.А. Черноиваненко // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 4 (81). Дніпропетровськ. - 2012. – С. 155–164.
2. Лахтин Ю.М., Леонтьева В.П. Материаловедение. — М.: Машиностроение, 1990.
3. Потапов А.А., Гуляев Ю.В., Никитов С.А., Пахомов А.А., Потапова В.А.. Новейшие методы обработки изображений. / Под ред. А.А. Потапова. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 496 с.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СОПРОТИВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЮ ЛЕНТЫ С ГРУЗОМ ПО РОЛИКООПОРАМ КОНВЕЙЕРА С ЛЕНТОЙ ГЛУБОКОЙ ЖЕЛОБЧАТОСТИ

Анотація. Розроблено математичну модель опору руху стрічки з вантажем по трехроліковим опорам конвеєра зі стрічкою глибокої жолобчастих. Модель заснована на теорії кочення твердих циліндрів по в'язкопружним циліндричним пластин з урахуванням згинальної жорсткості стрічки і деформації вантажу. В результаті отримано залежності коефіцієнта опору руху стрічки по роликоопор конвеєра зі стрічкою глибокої жолобчастих натягу та швидкості стрічки, її в'язкопружних властивостей, параметрів лотка стрічки і фізико-механічних властивостей вантажу.

Ключові слова: опір руху, стрічка, конвеєр, глибока жолобчастих, роликоопори.

Аннотация. Разработана математическая модель сопротивления движению ленты с грузом по трехроликовым опорам конвейера с лентой глубокой желобчатости. Модель основана на теории качения твердых цилиндров по вязкоупругим цилиндрическим пластинам с учетом изгибной жесткости ленты и деформации груза. В результате получены зависимости коэффициента сопротивления движению ленты по роликоопорам конвейера с лентой глубокой желобчатости от натяжения и скорости ленты, ее вязкоупругих свойств, параметров лотка ленты и физико-механических свойств груза.

Ключевые слова: сопротивление движению, лента, конвейер, глубокая желобчатость, роликоопоры.

Abstract. A mathematical model of the resistance to motion-tape burden on three roller conveyor belt supports deep grooved. The model is based on the theory of solid cylinders rolling on cylindrical plates viscoelastic given flexural rigidity and belt deformation load. As a result, the dependences of the drag coefficient of the belt on the roller carriage conveyor belt deep grooved relief and belt speed, its viscoelastic properties, the parameters of the tape tray and physico-mechanical properties of the load.

Keywords: resistance to movement, ribbon, belt, deep grooved roller.

Актуальность. Одним из путей повышения производительности и угла наклона ленточных конвейеров угольных шахт является использование става конвейера с глубоко желобчатой лентой. Однако, из-за больших сил распора связанных с деформацией груза, сила сопротивления движения глубокой желобчатой ленты по роликоопорам ленточного конвейера существенно больше по сравнению с конвейером обычной желобчатости. Для конвейеров с лентой обыкновенной желобчатости сила сопротивления движению ленты по роликоопорам и ее составляющие изучены достаточно хорошо [1–4]. Для ленты с глубокой желобчатостью сила сопротивления движению ленты по роликоопорам изучена недостаточно.

Постановка задачи

Величина силы сопротивления движению ленты по роликоопорам конвейера с лентой глубокой желобчатости, также как для конвейера с лентой обыкновенной желобчатости, определяется суммой составляющих от вращения роликов, от вдавливания роликов в ленту, от изгиба ленты и от деформации груза [1–4]. Однако, согласно работам [4, 5], в случае ленты с глубокой желобчатостью, основной вклад в силу сопротивления движению ленты по роликоопорам вносят составляющие, обусловленные изгибом ленты и деформацией груза.

Поэтому рассмотрим силы сопротивления движению ленты по роликоопорам конвейера с лентой глубокой желобчатости, обусловленные изгибом ленты и деформацией груза.

Решение задачи

Представим ленту с грузом в виде вязкоупругого желоба, движущегося по трехроликовым опорам. Согласно работам [4, 5], при движении ленты с грузом на борта лотка ленты со стороны сыпучего груза действуют активные и пассивные распределенные нагрузки, вызванные гистерезисом сил распора сыпучего груза.

Кроме того, на дно лотка ленты действует постоянная распределенная нагрузка, обусловленная силой тяжести сыпучего груза.

Согласно принципу относительности механики, задачу движения лотка ленты с грузом по роликоопорам ленточного конвейера можно заменить задачей качения роликоопор по вязкоупругому лотку, заполненному сыпучим грузом.

Кроме того, предположим, что продольная жесткость ленты на изгиб мало влияет на напряженно-деформированное состояние ленты и груза. Тогда ленту можно представить в виде трех вязкоупругих пластин (одна средняя и две боковые) (рис. 1), которые движутся по жестким роликам, расположенным на одинаковых расстояниях друг от друга. При этом центральная и боковые пластины растянуты силами натяжения S (Н) и нагружены распределенными нагрузками q_c (Н/м) – центральная пластина и активной q_a (Н/м) и пассивной q_n (Н/м) распределенными нагрузками – боковые пластины.

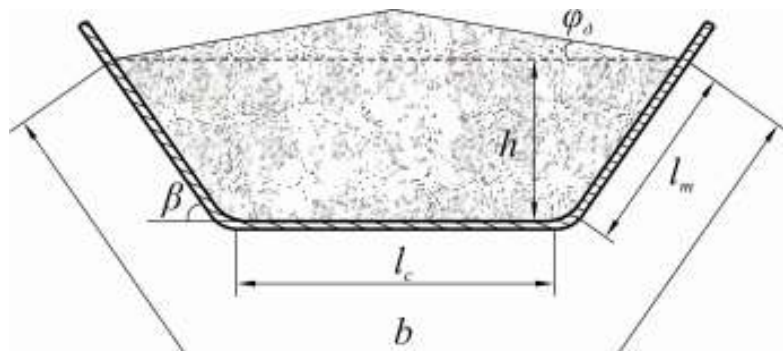


Рисунок 1. – Поперечное сечение желоба ленты конвейера с трехроликовой опорой

Вначале рассмотрим задачу качения роликов по средней пластине.

Предположим, что лента с роликами роlikоопор конвейера контактирует по образующей поверхности ролика, т.е. контакт ленты с роликами является контактом I рода [6].

Поставленную задачу разобьем на две задачи: внешнюю и внутреннюю. Во внешней задаче рассмотрим напряженно-деформированное состояние вязкоупругой пластины, растянутой силами натяжения S и нагруженной распределенной нагрузкой q_c и расположенной между центральными роликами (рис. 2).

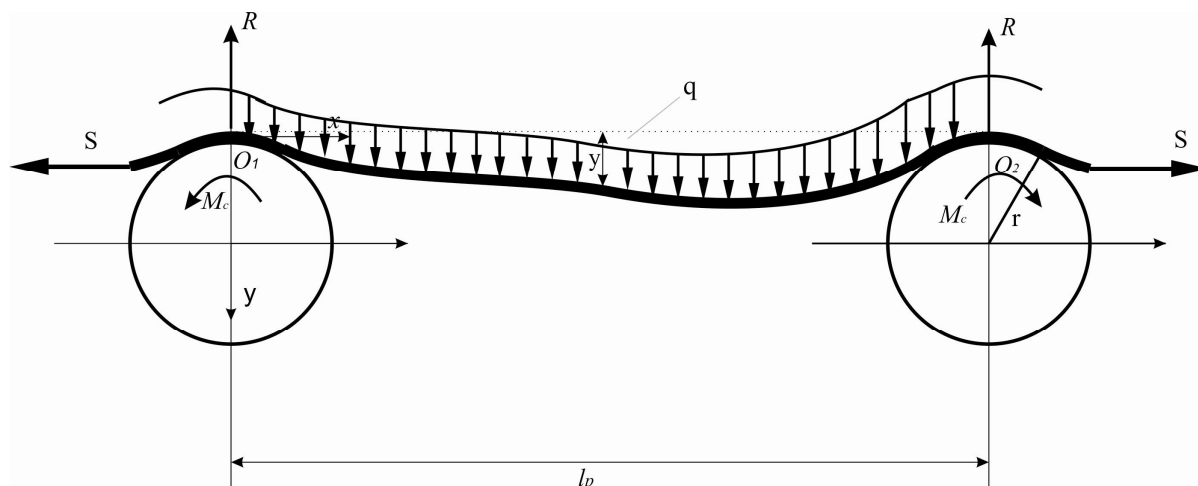


Рисунок 2. – Расчетная схема определения силы сопротивления движению дна лотка ленты с грузом по роликам ленточного конвейера

Во внутренней задаче рассмотрим силы и моменты, действующие в точке контакта ленты с центральными роликами.

Рассмотрим внешнюю задачу. Определим изгибный момент M_c в каждой точке вязкоупругой цилиндрической пластины, движущейся со скоростью v_l по роликам, расположенным на расстоянии l_p друг от друга (см. рис. 2).

Согласно принципу Вольтера [6, 7], для решения задачи наследственной теории упругости сначала нужно найти решение задачи обычной теории упругости и в окончательном результате заменить упругие постоянные функциями ползучести или релаксации, т.е. функциями, определяющими напряженное и деформационное состояние твердого тела, отвечающими единичной ступеньке напряжения или деформации, соответственно.

В случае изгиба вязкоупругой пластины нормальные продольные напряжения для каждого нормального сечения x пластины (см. рис. 2), согласно [6], определяются по формуле

$$\sigma_x(t) = \int_0^t \psi(t-t') \frac{\partial \varepsilon_x(t')}{\partial t'} dt', \quad (1)$$

где $\sigma_x(t)$, $\varepsilon_x(t)$ – продольные напряжения и деформации в каждой точке нормального сечения вязкоупругой пластины в момент времени t ; $\psi(t)$ – функция релаксации для вязкоупругого тела.

Функция релаксации $\psi(t)$ для тела Кельвина, согласно [8], определяется по формуле

$$\psi(t) = K_2(1 + \gamma_2 e^{-t/T_2}), \quad (2)$$

где K_2 – длительный модуль упругости ленты при ее изгибе в продольной плоскости, Н/м; γ_2 – константа тела Кельвина при изгибе ленты; T_2 – время релаксации при изгибе ленты, с.

В формуле (2) K_2 определяется упругими свойствами ленты. Согласно теории изгиба цилиндрической упругой пластины K_2 вычисляется по формуле [9]:

$$K_2 = \frac{E_p}{1 - \nu^2}, \quad (3)$$

где E_p – модуль упругости ленты при растяжении, Н/м²; ν – коэффициент Пуассона.

Время релаксации для тела Кельвина при изгибе ленты определяется по формуле [8]

$$T_2 = \frac{\mu_2 \gamma_2}{(1 + \gamma_2)^2 K_2}, \quad (4)$$

где μ_2 – коэффициент вязкости ленты при ее изгибе в продольной плоскости, Н·с/м².

Изгибающий момент M (Н·м) в каждой точке сечения вязкоупругой пластины в момент времени t , согласно теории изгиба [9], определим по формуле

$$M(t) = b \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_x(t) z' dz' \quad (5)$$

где h – толщина пластины (ленты), м; z' – вертикальная координата точки сечения пластины, м.

Согласно [9], для цилиндрической пластины связь между деформацией и прогибом определяется по формуле

$$\varepsilon_x = -z' \frac{d^2 y}{dx^2}, \quad (6)$$

где y – прогиб упругой пластины между роликами, м.

Подставляя (1) в (5) с учетом (2) и (6), при этом переходя в интеграле от переменных t и t' к переменным x и x' ($x = v_\lambda t$, $x' = v_\lambda t'$), после интегрирования получим

$$M(x) = -D_0 \int_0^x \left[1 + \gamma_2 e^{\frac{-(x-x')}{v_\lambda T_2}} \right] \frac{d^3 y}{dx'^3} dx' \quad (7)$$

где D_0 – изгибная жесткость ленты, Н·м²; v_λ – скорость ленты конвейера, м/с.

Изгибная жесткость цилиндрической пластины определяется по формуле

$$D_0 = \frac{l_c h^3 E_p}{12(1 - \nu^2)}, \quad (8)$$

где l_c – ширина дна лотка ленты конвейера, м.

Согласно [9], прогиб упругой пластины длиной l_p , защемленной на концах, растянутой силой натяжения S и нагруженной вертикально распределенной нагрузкой q_c , определяется по формуле

$$y = \frac{q_c l_p^4}{16u^3 D_0 \text{th} u} \left\{ \frac{\text{ch}[u(1 - 2x/l_p)]}{\text{ch} u} - 1 \right\} + \frac{q_c l_p^2 (l_p - x)x}{8u^2 D_0}, \quad (9)$$

где $u = \frac{l_p}{2} \sqrt{\frac{S}{D_0}}$.

Подставляя (9) в (7), после интегрирования получим изгибающий момент M_c (Н·м) в каждой точке x дна лотка ленты:

$$M_c(x) = M_{cy}(x) + M_{cv}(x), \quad (10)$$

где

$$\begin{aligned} M_{cy}(x) &= -\frac{q_c l_p^2}{8} \cdot \frac{\text{ch}[u(1 - 2x/l_p)]}{u \text{sh} u} + \frac{q_c D_1}{S}; \\ M_{cv}(x) &= -\frac{q_c l_p^2}{8} \cdot \frac{\beta}{\text{sh} u} \left\{ \frac{e^{(u-x)/(v_s T_2)}}{-u + l_p/(2v_l T_2)} \cdot [e^{(l_p/(2v_l T_2) - u)2x/l_p} - 1] - \right. \\ &\quad \left. - \frac{e^{-(u+x)/(v_s T_2)}}{u + l_p/(2v_l T_2)} \cdot [e^{(l_p/(2v_l T_2) + u)2x/l_p} - 1] \right\}. \end{aligned} \quad (11)$$

Здесь $M_{cy}(x)$, $M_{cv}(x)$ – моменты, соответствующие упругой и вязкой составляющим изгибной деформации пластины в точке x .

Предположим, что распределенная нагрузка на дно лотка ленты определяется по формуле

$$q_c = \gamma h_c,$$

где γ – удельный вес груза, Н/м³; h_c – средняя высота груза на ленте конвейера, м.

Анализ эпюр прогибов и изгибающих моментов дна лотка ленты, построенных по формуле (11), показал их несимметричность относительно середины интервала между роlikоопорами. (см. рис 2). При этом с уменьшением изгибной жесткости бортов ленты D_1 эпюра прогибов дна ленты и изгибающих моментов приближается к кривым симметричным относительно центра интервала между роlikоопорами. При этом эпюры изгибающих моментов в точках контакта ленты с роlikоопорами даст скачек.

Рассмотрим внутреннюю контактную задачу. Для определения сил сопротивления движению дна лотка ленты по центральным роliкам

роlikоопор конвейера, обусловленных изгибом ленты и деформацией груза, составим уравнение равновесия моментов сил, приложенных к ролику в точке К контакта ленты с центральными роликами относительно центра вращения боковых роликов О (рис. 3).

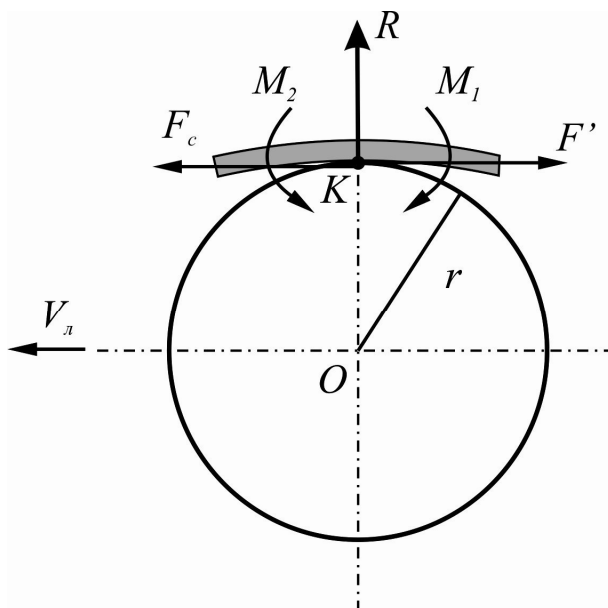


Рисунок 3. – Расчетная схема моментов сил, действующих на боковые ролики ленточного конвейера

В результате имеем

$$M_2 - M_1 = F'_c r, \quad (12)$$

где M_1 , M_2 - изгибающие моменты приложенные к ленте в точке контакта ленты с роли справа и слева соответственно. F'_c - сила сопротивления качению центральных роликов по ленте конвейера, обусловленная изгибом ленты и деформацией груза, Н; r - радиус ролика, м.

Из равенства (12) получим

$$F'_c = \frac{M_2 - M_1}{r}. \quad (13)$$

Так как M_1 и M_2 - это моменты сил, действующих на ленту в точке контакта ленты с роликом К слева и справа, то выполняются равенства

$$M_1 = M_c(0) \quad \text{и} \quad M_2 = M_c(l_p). \quad (14)$$

Сила сопротивления движению ленты по центральным роликам, обусловленная изгибом ленты и деформацией груза, равняется

$$F_c = F'_c.$$

Подставляя (14) в (13) с учетом последнего равенства, после преобразования получим:

$$F'_c = \frac{M_c(l_p) - M_c(0)}{r}. \quad (15)$$

Момент сопротивления движению вязкоупругой пластины по роликам в нашем случае равняется разности моментов в точке касания пластины с роликом со стороны набегающего и со стороны сбегающего пластины с ролика:

$$M_c = M(l_p) - M(0). \quad (16)$$

Подставляя в формулу (10) $x = 0$ и $x = l_p$, из (16) получим

$$M_c = \frac{q_c l_p^2}{8} \cdot \frac{\beta}{\operatorname{sh} u} \left[\frac{e^u - e^{-(u+1/\zeta_2)}}{u + 1/(2\zeta_2)} + \frac{e^{-u} - e^{(u-1/\zeta_2)}}{u - 1/(2\zeta_2)} \right], \quad (17)$$

где $\zeta_2 = \frac{v_l T_2}{l_p}$ – число Дебора при изгибе ленты [6].

Силу сопротивления движению дна лотка ленты по центральным роликам определим по формуле

$$F_c = \frac{M_c}{r}. \quad (18)$$

Подставляя (17) в (18), получим

$$F_c = \frac{q_c l_p^2}{8} \cdot \frac{\beta}{\operatorname{sh} u} \left[\frac{e^u - e^{-(u+1/\zeta_2)}}{u + 1/(2\zeta_2)} + \frac{e^{-u} - e^{(u-1/\zeta_2)}}{u - 1/(2\zeta_2)} \right]. \quad (19)$$

Коэффициент сопротивления движению дна лотка ленты по центральным роликам в нашем случае определится по формуле

$$k_c = \frac{F_c}{q_c l_p}. \quad (20)$$

Подставляя (19) в (20), окончательно получим коэффициент сопротивления движению дна лотка ленты по центральным роликам в виде:

$$k_c = \frac{l_p}{8r} \cdot \frac{\gamma_2}{\operatorname{sh} u} \left[\frac{e^u - e^{-(u+1/\zeta_2)}}{u + 1/(2\zeta_2)} + \frac{e^{-u} - e^{(u-1/\zeta_2)}}{u - 1/(2\zeta_2)} \right]. \quad (21)$$

Из анализа формулы (21) следует, что коэффициент сопротивления движению дна лотка ленты по центральным роликам роликотопор обусловлен, в основном, изгибом ленты и зависит от натяжения S и скорости ленты v_l , радиуса роликов r , изгибной жесткости дна лотка ленты D_0 , времени релаксации ленты при ее изгибе T_2 (вязкости ленты при ее изгибе μ_2) и не зависит от погонной нагрузки q_c и расстояния между роликотопорами конвейера l_p .

Определим теперь сопротивление движению бортов ленты по боковым роликам. Для этого, согласно принципу относительности механики, рассмотрим задачу качения боковых роликов по вязкоупругой пластине.

Рассмотрим внешнюю задачу, т.е. определим прогиб боковых вязкоупругих пластин под действием активной q_a и пассивной q_n распределенных нагрузок.

Сначала представим борта ленты как упругие цилиндрические пластины, жестко закрепленные в точках контакта с роликами,

растянутые силами натяжения S и нагруженные распределенной нагрузкой $q(x)$ (рис. 4).

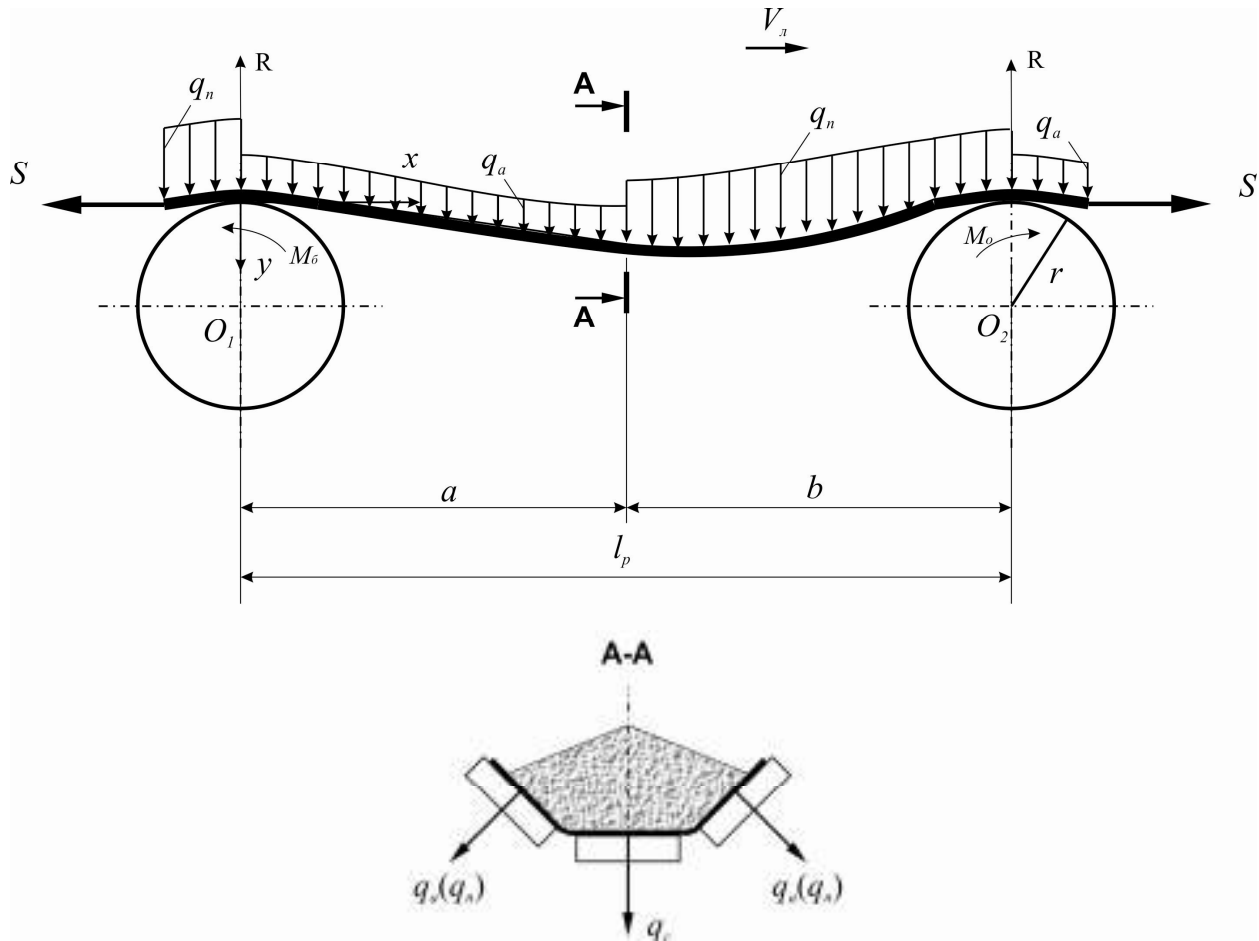


Рисунок 4. – Расчетная схема нагрузок и деформации бортов лотка ленты конвейера

Уравнение упругой деформации бортов ленты при ее движении между роlikоопорами запишем в виде [9]:

$$D_1 \frac{d^4 y}{dx^4} - S \frac{d^2 y}{dx^2} = q(x), \quad (22)$$

где D_1 – изгибная жесткость бортов лотка ленты, Н·м².

При этом распределенная нагрузка, действующая на эти цилиндрические пластины, представляется в виде

$$q(x) = \begin{cases} q_a, & \text{если } 0 \leq x \leq a; \\ q_n, & \text{если } a \leq x \leq l_p = a + a_1, \end{cases} \quad (23)$$

где y – упругая деформация пластины в нормальном направлении, м; a – промежуток между роlikоопорами, в пределах которого действует активная распределенная нагрузка q_a , м; a_1 – промежуток между роlikоопорами, в пределах которого действует пассивная распределенная нагрузка q_n , м.

Согласно работе [4], активная q_a и пассивная q_n распределенные нагрузки на борта ленты трехроликовых опор определяются по формулам (см. рис. 1):

$$q_a = \frac{\gamma l_m^2}{2} (\cos^2 \beta + m \sin^2 \beta) \sin \beta ;$$

$$q_n = \frac{\gamma l_m^2}{2} \left(\cos^2 \beta + \frac{\sin^2 \beta}{m} \right) \sin \beta , \quad (24)$$

где l_m – максимальная ширина бортов ленты, заполненной грузом, м, $l_m = (b - l_c) / 2$; b – длина линии контакта груза в поперечном сечении ленты, $b = 0,9B - 0,05$, м; B – ширина ленты конвейера, м; β – угол наклона боковой стенки лотка, град; m – коэффициент подвижности груза ($m = 1 + 2f^2 - 2f\sqrt{1+f^2}$); f – коэффициент внутреннего трения сыпучего груза [10].

Уравнение (22), с учетом (23), можно разбить на два:

$$D_1 \frac{d^4 y_1}{dx^4} - S \frac{d^2 y_1}{dx^2} = q_a \quad \text{при } 0 \leq x \leq a ; \quad (25)$$

$$D_1 \frac{d^4 y_2}{dx^4} - S \frac{d^2 y_2}{dx^2} = q_n \quad \text{при } a \leq x \leq l_p , \quad (26)$$

где y_1, y_2 – нормальные изгибы бортов ленты на участках действия активного и пассивного боковых давлений соответственно, м.

При этом должны выполняться граничные условия:

– на левом конце пластины

$$\text{при } x = 0 \quad y_1 = 0 \quad \frac{dy_1}{dx_1} = 0 ; \quad (27)$$

– на правом конце пластины

$$\text{при } x = l_p \quad y_2 = 0 \quad \frac{dy_2}{dx_2} = 0 . \quad (28)$$

Кроме того, в точке скачка бокового давления на борта ленты со стороны груза из условий непрерывности деформации, углов наклона ленты, моментов и перерезывающих сил в сечении ленты должны выполняться условия:

$$\text{при } x = a \quad y_1 = y_2 \quad \frac{dy_1}{dx_1} = \frac{dy_2}{dx_2} ; \quad \frac{d^2 y_1}{dx_1^2} = \frac{d^2 y_2}{dx_2^2} ; \quad \frac{d^3 y_1}{dx_1^3} = \frac{d^3 y_2}{dx_2^3} . \quad (29)$$

Общее решение системы уравнений (25), (26) имеет вид:

$$y_1 = \frac{1}{w^2} [c_{11} e^{wx} + c_{12} e^{-wx}] - \frac{q_a x^2}{2S} + c_{13} x + c_{14} \quad \text{при } 0 \leq x \leq a ; \quad (30)$$

$$y_2 = \frac{1}{w^2} [c_{21} e^{wx} + c_{22} e^{-wx}] - \frac{q_n x^2}{2S} + c_{23} x + c_{24} \quad \text{при } a \leq x \leq l_p , \quad (31)$$

где $w = \sqrt{\frac{S}{D_1}}$.

Подставляя (30) и (31) в граничные условия (27), (28) и условия (29), определим неизвестные константы $c_{11}, c_{12}, c_{13}, c_{14}, c_{21}, c_{22}, c_{23}, c_{24}$.

Изгибающий момент в случае изгиба вязкоупругой пластины, приложенный к бортам ленты конвейера, определим согласно принципа Вольтера по формуле (7).

Разобьем интеграл в формуле (7) на два интеграла, связанных с упругой и вязкой составляющими от общего момента. В результате получим изгибный момент M_σ (Н·м) в каждой точке x борта лотка ленты:

$$M_\sigma(x) = M_\sigma^y(x) + M_\sigma^e(x), \quad (32)$$

где

$$M_\sigma^y(x) = D_1 \int_0^x \frac{d^3 y}{dx'^3} dx', \quad M_\sigma^e(x) = D_1 \int_0^x \left[\gamma_2 e^{\frac{-(x-x')}{v_s T_2}} \right] \frac{d^3 y}{dx'^3} dx'. \quad (33)$$

Подставляя (30) и (31) в (33), разбив при этом интервал интегрирования на два $(0, a)$ и (a, x) , после преобразования получим:

– для упругой составляющей

$$M_\sigma^y(x) = M_{\sigma 1}^y(x) + M_{\sigma 2}^y(x), \quad (34)$$

где

$$M_{\sigma 1}^y(x) = D_1 \left[c_{11} (e^{wx} - 1) + c_{12} (e^{-wx} - 1) \right] + M_0^y; \quad (35)$$

$$M_{\sigma 2}^y(x) = D_1 e^{-w(a+x)} \left(e^{wa} - e^{wx} \right) \left[c_{22} - c_{21} e^{w(a+x)} \right] + M_{1a}^y. \quad (36)$$

Здесь

$$M_0^y = D_1 \left(c_{11} + c_{12} - \frac{q_a}{S} \right);$$

$$M_{1a}^y(x) = D_1 \left[c_{11} (e^{wa} - 1) + c_{12} (e^{-wa} - 1) \right]; \quad (37)$$

– для вязкой составляющей

$$M_\sigma^e(x) = M_{\sigma 1}^e(x) + M_{\sigma 2}^e(x), \quad (38)$$

где

$$M_{\sigma 1}^e(x) = D_1 v_s T_2 \gamma_2 e^{\frac{x}{v_s T_2}} w \left[c_{11} \left(e^{\left(w - \frac{1}{v_s T_2} \right) x} - 1 \right) / (v_s T_2 w - 1) + c_{12} \left(e^{\left(-w + \frac{1}{v_s T_2} \right) x} - 1 \right) / (v_s T_2 w + 1) \right]; \quad (39)$$

$$M_{\sigma 2}^e(x) = D_1 v_s T_2 \gamma_2 e^{\frac{x}{v_s T_2}} w \left[c_{21} \left(e^{\left(w + \frac{1}{v_s T_2} \right) x} - e^{\left(w + \frac{1}{v_s T_2} \right) a} \right) / (1 + v_s T_2 w) - \right.$$

$$\left. - c_{22} \left(e^{\left(-w + \frac{1}{v_s T_2} \right) a} - e^{\left(-w + \frac{1}{v_s T_2} \right) x} \right) / (1 - v_s T_2 w) \right] + M_{1a}^e. \quad (40)$$

Здесь M_{1a}^e определяется по формуле

$$M_{1a}^e = D_1 v_s T_2 \gamma_2 e^{\frac{a}{v_s T_2}} w \left[c_{11} \left(e^{\left(w - \frac{1}{v_s T_2} \right) a} - 1 \right) / (v_s T_2 w - 1) + c_{12} \left(e^{\left(-w + \frac{1}{v_s T_2} \right) a} - 1 \right) / (v_s T_2 w + 1) \right]. \quad (41)$$

Анализ эпюр прогибов и изгибающих моментов дна лотка ленты, построенных по формуле (11), показал их несимметричность относительно середины интервала между роlikоопорами. (см. Рис 2). При этом с уменьшением изгибной жесткости бортов ленты D_1 эпюра прогибов бортов ленты и изгибающих моментов приближается к кривым симметричным относительно центра интервала между роlikоопорами. Кроме того эпюры изгибающих моментов в точках контакта ленты с боковыми роliками имеет скачек.

Силу сопротивления движению борта ленты по боковым роliкам F_σ (Н) определим, как и выше, решая внешнюю задачу (см. Рис 3). В результате получим

$$F_\sigma = \frac{M_\sigma(l_p) - M_\sigma(0)}{r} \quad (42)$$

Коэффициент сопротивления движению бортов ленты по боковым роliкам трехроlikовой опоры конвейера определим по формуле

$$k_\sigma = \frac{2F_\sigma}{q_m l_p} \quad (43)$$

где максимальный вес груза на ленте конвейера с трехроlikовыми опорами q_m (Н/м) определяется по формуле

$$q_m = \gamma[l_m \sin \beta \cdot (l_c + l_m \cos \beta) + \frac{(l_c + 2l_m \cos \beta)^2}{4} \operatorname{tg} \phi_\partial] \quad (44)$$

где ϕ_∂ – угол естественного наклона насыпного груза при его движении по роlikоопорам конвейера, град.

После подстановки в формулу (43) значения F_σ из формулы (42) с учетом формул (34)–(41) получим коэффициент сопротивления движению бортов ленты по боковым роliкам трехроlikовых опор конвейера в виде суммы составляющих от изгиба ленты $k_{\sigma u}$ и деформации груза $k_{\sigma \partial}$:

$$k_\sigma = k_{\sigma u} + k_{\sigma \partial} \quad (45)$$

Общий коэффициент сопротивления движению ленты по трехроlikовым опорам конвейера с лентой глубокой желобчатости определим согласно [1] по формуле

$$k_o = \frac{F_c + 2F_\sigma}{q_m l_p} \quad (46)$$

Подставляя в (46) F_c и F_σ из формул (20) и (43), после преобразования получим

$$k_o = \frac{k_c q_c + k_\sigma q_m}{q_m} \quad (47)$$

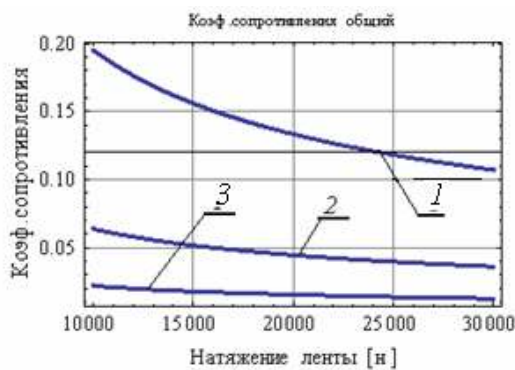
Из анализа полученной зависимости (47) следует, что сила сопротивления движению ленты по роlikоопорам конвейера с лентой глубокой желобчатости в основном обусловлена изгибом ленты и деформацией груза и зависит от натяжения S и скорости ленты v_l , формы

и параметров лотка ленты l_c , l_m , β , вязкоупругих свойств ленты E_p , γ_2 , T_2 , μ_2 , D_0 , D_1 и физико-механических свойств груза γ , f , φ_∂ .

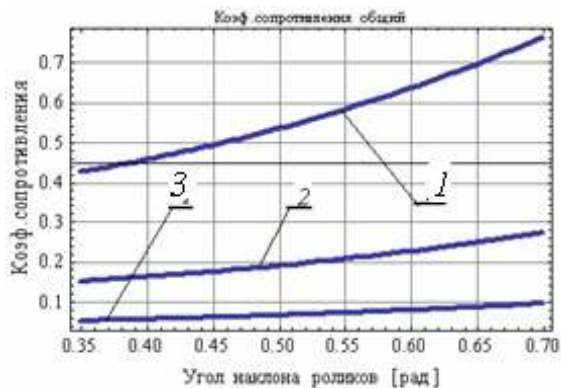
На рис. 5,а,б показаны графики зависимости общего коэффициента сопротивления движению ленты k_o по трехроликовым опорам конвейера с лентой глубокой желобчатости от натяжения ленты S и угла наклона боковых роликов β при различных значениях изгибной жесткости ленты $D_0 = D_1 = 16; 4; 0,2 \text{ Н}\cdot\text{м}^2$.

При этом параметры конвейера, лотка ленты, вязкоупругих свойств ленты и физико-механических свойств транспортируемого груза принимали следующие значения: $S = 10000 \text{ Н}$; $v_l = 1 \text{ м/с}$; $l_p = 1,0 \text{ м}$; $l_c = 0,43 \text{ м}$; $\beta = 40^\circ$; $a = 0,5 \text{ м}$; $h = 0,02 \text{ м}$; $E_p = 3,0 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^2$; $\nu = 0,5$; $T_2 = 0,01 \text{ с}$ ($\mu_2 = 12,0 \cdot 10^5 \text{ Н с/м}^2$); $\gamma_2 = 1,0$; $\gamma = 10000 \text{ Н/м}^3$; $f = 0,7$.

Из графиков (см. рис. 5,а) видно, что с увеличением натяжения ленты общий коэффициент сопротивления движению ленты по роликоопорам k_o уменьшается, а при увеличении изгибной жесткости ленты – увеличивается.



а)



б)

1 – $D_1 = 16 \text{ Н}\cdot\text{м}^2$; 2 – $D_1 = 4 \text{ Н}\cdot\text{м}^2$; 3 – $D_1 = 0,2 \text{ Н}\cdot\text{м}^2$

Рисунок 5. – Графики зависимости общего коэффициента сопротивления движению ленты по трехроликовым опорам конвейера k_o от натяжения ленты S и угла наклона боковых роликов β :

а) величины натяжения ленты; б) угла наклона боковых роликов

Из графиков (см. рис. 5,б) видно, что с увеличением угла наклона боковых роликов общий коэффициент сопротивления k_o увеличивается. При этом, чем больше изгибная жесткость ленты, тем быстрее коэффициент k_o увеличивается.

Выводы

1. На основании теории качения твердых цилиндров по вязкоупругим пластинам получена математическая модель сопротивления движению ленты по трехроликовым опорам конвейера с лентой глубокой желобчатости.

2. Получены зависимости коэффициента сопротивления движению ленты по трехроликовым опорам конвейера с лентой глубокой желобчатости от параметров конвейера, лотка ленты, вязкоупругих свойств ленты и физико-механических свойств сыпучего груза.

3. Установлено, что сила сопротивления движению ленты с грузом по трехроликовым опорам конвейера с лентой глубокой желобчатости обусловлена, в основном, изгибом ленты и деформацией груза. При этом коэффициент сопротивления движению ленты по роликоопорам конвейера с увеличением натяжения ленты уменьшается, а с увеличением угла наклона боковых роликов увеличивается.

4. Коэффициент сопротивления движению ленты по роликоопорам конвейера зависит от изгибной жесткости ленты и с ее увеличением возрастает, мало зависит от скорости ленты и расстояния между роликоопорами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шахмейстер Л. Г. Теория и расчет ленточных конвейеров / Л. Г. Шахмейстер, В. Г. Дмитриев. – М.: Машиностроение, 1987. – 336 с.
2. Кирия Р. В. Определение коэффициента сопротивления движению ленты по роликоопорам мощного конвейера / Р. В. Кирия, В. Ю. Максютенко, Т. Ф. Мищенко, Н. Г. Ларионов // Геотехническая механика: Межвед. сб. научн. тр. / ИГТМ НАНУ. – Днепропетровск, 2010 – Вып. 86. – С. 248–254.
3. Кирия Р. В. О сопротивлении движению вязкоупругой нагруженной ленты по роликоопорам ленточного конвейера / Р. В. Кирия // Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій. Сб. наук. праць. – Дніпропетровськ: Ліра, 2014. – Вип. 22. – С. 118–132
4. Кирия Р. В. Определение сил сопротивления движению ленты по роликоопорам ленточного конвейера, обусловленных деформацией груза / Р. В. Кирия, Н. Г. Ларионов // Збірник наукових праць НГУ. – Дніпропетровськ: Державний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет», 2014. – №44. – С. 43–53.
5. Гуцин В. М. Сопротивление движению тягового органа конвейера с лентой глубокой желобчатости для повышенных углов наклона / В. М. Гуцин // Шахтный и карьерный транспорт. – М.: Недра, 1975. – Вып. 2. – С. 113–117.
6. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия / К. Джонсон. – М.: Мир, 1989. – 510 с.
7. Работнов Ю. Н. Элементы наследственной механики твердых тел / Ю. Н. Работнов. – М.: Наука, 1977. – 383 с.
8. Малинин Н. Н. Прикладная теория пластичности и ползучести / Н. Н. Малинин. – М.: Машиностроение, 1975. – 400 с.
9. Тимошенко С. П. Пластины и оболочки / С. П. Тимошенко, С. Войковский, Р. Кригер. – М.: Физ-мат. Литература, 1963. – 635 с.
10. Зенков Р. Л. Механика насыпных грузов / Р. Л. Зенков. – М.: Машиностроение, 1964. – 251 с.

УДК: 621.744.002

А.Т. Мамедов, Ф.Ф. Мамедов, Н.Г. Поладов

УСЛОВИЯ ПРИЛИПАЕМОСТИ СЛОЯ ФОРМОВОЧНОЙ СМЕСИ С МОДЕЛЬЮ ЛИТЕЙНОЙ ФОРМЫ

Аннотация. Определены два условия неприлипаемости формовочной смеси к поверхности модели литейной формы, для их обеспечения получены математические выражения. Определены коэффициенты отношения сил адгезии и когезии смеси и модели в различных координационных числах, найдена степень упаковки зерен наполнителя формовочной смеси в зависимости от этих коэффициентов.

Ключевые слова: формовочная смесь, модель литейной формы, координационное число, прилипаемость, наполнитель.

Анотація. Визначено дві умови нелипкості формувальної суміші до поверхні моделі ливарної форми. Для забезпечення цього виведено математичні вирази. Визначено коефіцієнти відношення сил адгезії й когезії суміші й моделі в різних координаційних числах, знайдено ступінь упаковки зерен наповнювача формувальної суміші залежно від цих коефіцієнтів.

Ключові слова: формувальна суміш, модель ливарної форми, координаційне число, липкість, наповнювач.

Annotation. In two cases, to determine the conditions not slidenote molding material mixture model forms derived mathematical formula to ensure their implementation. When different coordination numbers determined ratio adhesion and cohesion forces of the model mixture and, depending on their degree of packing defined filler particle mixture.

Key words: form, a mixture of a mathematical formula, packaging, coordination number, not slidenote, filler.

Введение

После уплотнения формовочной смеси зерна ее наполнителя соприкасаются с поверхностью модели. После плотного контакта поверхности модели с формой в условиях статического натяжения возникают адгезионные силы между тонким слоем связующего и моделью [1-3]. Этот тонкий слой вместе с частичками кварца может прилипать к поверхности модели, что являет собой существенную проблему в литейном производстве.

Постановка задачи

Определить условия неприлипаемости формовочной смеси к поверхности модели литейной формы, вывести для их обеспечения математические выражения.

Обсуждение результатов

Объясним условия для избегания этого явления. В момент прилипания возникает активная взаимосвязь между частичкой формовочной смеси, покрытой тонкой пленкой связующего, и поверхностью модели [2; 3]. Адгезионные силы тонкой глинистой пленки к поверхности

модели снижают адгезионные силы на поверхности огнеупорного наполнителя [3; 4].

Для степени упаковки частичек $K=6$ вместо $\sigma_{ад}$ можно записать $(\sigma_{адг} - \sigma_{адг}^{mod})$. Здесь на $\sigma_{адг}^{mod}$ – на предел адгезионной прочности – можно смотреть в двух случаях:

1. В слое смеси, контактирующего с материалом модели. Здесь также как и в других слоях, упаковка мягкая и соответствует степени упаковки частичек наполнителя с координатным числом $K=6$.

2. В слое смеси, контактирующего с материалом модели. Здесь также как и в других слоях, упаковка плотная и соответствует степени упаковки частичек наполнителя с координатным числом $K=12$.

Получим условия прилипаемости для первого случая. С учетом сказанного выше уравнение 7', приведенное в работе [1], примет вид:

$$\sigma_{см.6} = \pi \left\{ 0,5\sigma_{адг} + \sigma_{коз} \left[\frac{\delta}{d} \left(1 + \frac{\delta}{d} \right) - 2 \left(\frac{1}{2} + \frac{\delta}{d} \right)^2 \left(\frac{\phi}{180} - \frac{\sin \phi}{\pi} \right) \right] \right\}. \quad (1)$$

В слое же смеси, находящейся вблизи к поверхности модели, будет

$$\sigma_{см6}^{mod} = \pi \left\{ 0,5(\sigma_{адг} - \sigma_{адг}^{mod}) + \sigma_{коз} \left[\frac{\delta}{d} \left(1 + \frac{\delta}{d} \right) - 2 \left(\frac{1}{2} + \frac{\delta}{d} \right)^2 \left(\frac{\phi}{180} - \frac{\sin \phi}{\pi} \right) \right] \right\}. \quad (2)$$

Обозначив, что

$$\frac{\sigma_{см6}}{\sigma_{см6}^{mod}} = a,$$

тогда

$$\sigma_{см6} = a\sigma_{см6}^{mod}$$

или

$$\pi [0,5\sigma_{адг} + \sigma_{коз}(x - 3y)] = a\pi [0,5(\sigma_{адг} - \sigma_{адг}^{mod}) + \sigma_{коз}(x - 2y)].$$

или

$$\sigma_{адг}^{mod} = \frac{a-1}{a} [\sigma_{адг} + 2\sigma_{коз}(x - 2y)]. \quad (3)$$

Отсюда

$$\frac{\sigma_{адг}^{mod}}{\sigma_{адг}} = \frac{a-1}{a} \left[1 + 2 \frac{\sigma_{коз}}{\sigma_{адг}} (x - 2y) \right]. \quad (4)$$

При $\frac{\sigma_{адг}^{mod}}{\sigma_{адг}} \geq 1$ тонкий слой материала связующего будет прилипать к поверхности модели.

Найдем условия для случая неприлипания. Видно, что слипание не будет при следующих условиях:

$$\frac{\sigma_{адг}^{mod}}{\sigma_{адг}} < 1 \quad (a)$$

и

$$\frac{\sigma_{адг}^{mod}}{\sigma_{коз}} < 1. \quad (б)$$

Первое условие (а) показывает, что

$$\frac{a-1}{a} \left[1 + 2 \frac{\sigma_{коз}}{\sigma_{адз}} (x-2y) \right] < 1.$$

Отсюда получаем:

$$\frac{2 \cdot \sigma_{коз}}{\sigma_{адз}} (x-2y) < \frac{a-1}{a} - 1$$

или

$$\frac{\sigma_{коз}}{\sigma_{адз}} > 2(a-1)(x-2y). \quad (5)$$

В рассматриваемом случае коэффициент «а» характеризует адгезионные силы материала модели и определяет возможность использования того или иного материала.

Рассмотрим теперь условия $\frac{\sigma_{адз}^{мод}}{\sigma_{коз}} < 1$, разделив уравнение (3) на $\sigma_{коз}$ и после преобразований получаем:

$$\frac{\sigma_{адз}^{мод}}{\sigma_{коз}} = \frac{a-1}{a} \left[\frac{\sigma_{адз}}{\sigma_{коз}} + 2(x-2y) \right] < 1$$

или

$$\frac{\sigma_{адз}}{\sigma_{коз}} < \frac{a-1}{a} - 2(x-2y). \quad (6)$$

В соответствии с указанными выше напомним условия неприлипаемости поверхностных слоев формовочной смеси к модели:

$$\begin{cases} \frac{\sigma_{адз}}{\sigma_{коз}} < \frac{a}{a-1} - 2(x-2y), \\ \frac{\sigma_{адз}}{\sigma_{коз}} > 2(a-1)(x-2y). \end{cases} \quad (7)$$

Обозначим кривые

$$\frac{\sigma_{адз}}{\sigma_{коз}} = \frac{a}{a-1} - 2(x-2y) - \text{«А»},$$

$$\frac{\sigma_{адз}}{\sigma_{коз}} = 2(a-1)(x-2y) - \text{«Б»}.$$

Тогда из условий (7) можно сделать вывод о том, что область прилипания на кривой «А» располагается внизу, в то время как на кривой «Б»верху (область МЕН на рис. 1, 2 и 3.).

При малых значениях адгезионных сил к поверхности модели (а=1,2) уравнения (5) и (6) примут вид:

$$\frac{\sigma_{адг}}{\sigma_{коз}} < 6 - 2(x-2y),$$

$$\frac{\sigma_{адг}}{\sigma_{коз}} > 0,4(x-2y).$$

Из графика, приведенного на рис. 1, видно, что для смеси, располагающейся внизу кривой Лясса [4], область разрушения NE находится в пределах $0,009 \leq \frac{\delta}{d} < 1,3$.

С увеличением адгезионных сил ($a=1,5$), действующих на поверхность модели, область неприлипания будет характеризоваться двумя неравенствами:

$$\frac{\sigma_{адг}}{\sigma_{ког}} < 3 - 2(x - 2y),$$

$$\frac{\sigma_{адг}}{\sigma_{ког}} > x - 2y.$$

В этом случае область неразрушения NE, расположенная на кривой А.М.Лясса [5; 6], находится в пределах $0,039 \leq \frac{\delta}{d} < 0,82$.

При $a=2$ уравнения (5) и (6) примут вид:

$$\frac{\sigma_{адг}}{\sigma_{ког}} < 2 - 2(x - 2y),$$

$$\frac{\sigma_{адг}}{\sigma_{ког}} > 2(x - 2y).$$

В площади неприлипания область неразрушения будет перемещаться вправо и располагаться в пределах $0,092 \leq \frac{\delta}{d} < 0,62$.

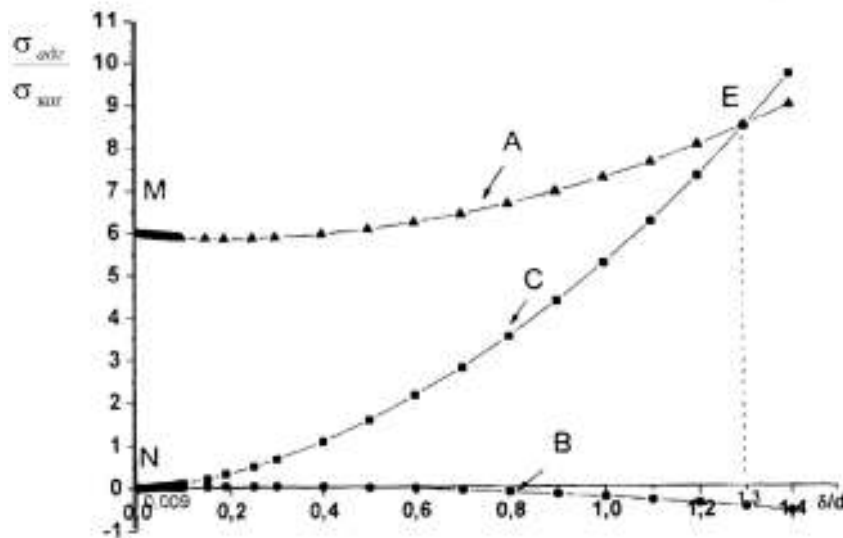


Рисунок 1. – Площадь неприлипания формовочной смеси при $a=1,2$

Из анализ графика, приведенного на рис. 2, видно, что площадь неразрушения смеси NE находится в пределах $0,14 \leq \frac{\delta}{d} < 0$. при «мягкой» упаковке новых частичек с возрастанием влияния сил адгезии происходит уменьшение интервала площади неприлипания.

При $a=2,6$

$$\frac{\sigma_{адг}}{\sigma_{коз}} < 1,625 - 2(x - 2y),$$

$$\frac{\sigma_{адг}}{\sigma_{коз}} > 3,2(x - 2y).$$

Дальнейшее повышение адгезионных сил к модели увеличивает коэффициент «а». Например при $a=3$:

$$\frac{\sigma_{адг}}{\sigma_{коз}} < 1,5 - 2(x - 2y),$$

$$\frac{\sigma_{адг}}{\sigma_{коз}} > 4(x - 2y).$$

В этом случае площадь прилипания, характеризуемая кривой Лясса, будет находиться пределах $0,17 \leq \frac{\delta}{d} < 0,5$.

При $a=4$ формулы (5) и (6) будет иметь вид:

$$\frac{\sigma_{адг}}{\sigma_{коз}} < 1,33 - 2(x - 2y),$$

$$\frac{\sigma_{адг}}{\sigma_{коз}} > 6(x - 2y).$$

Из анализа графика, показанного на рис. 3, видно, что площадь не прилипания NE будет находится в пределах $0,22 \leq \frac{\delta}{d} < 0,455$.

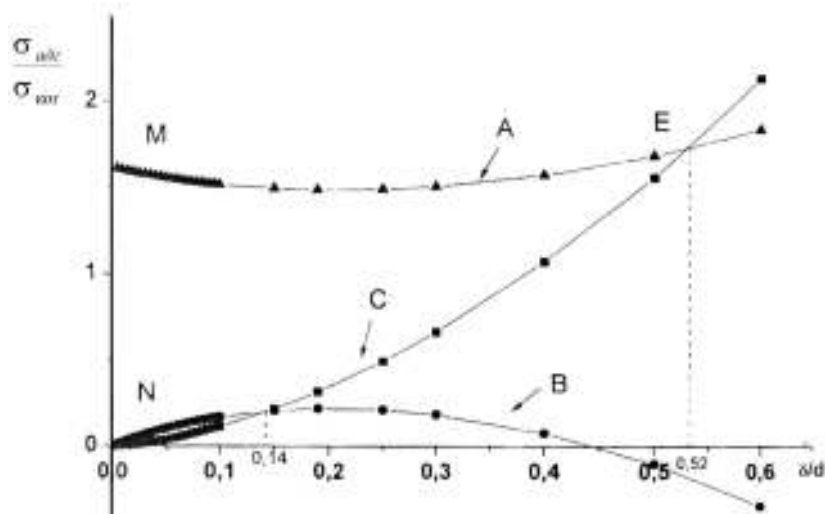


Рисунок 2. – Площадь не прилипания смеси при $a=2,6$

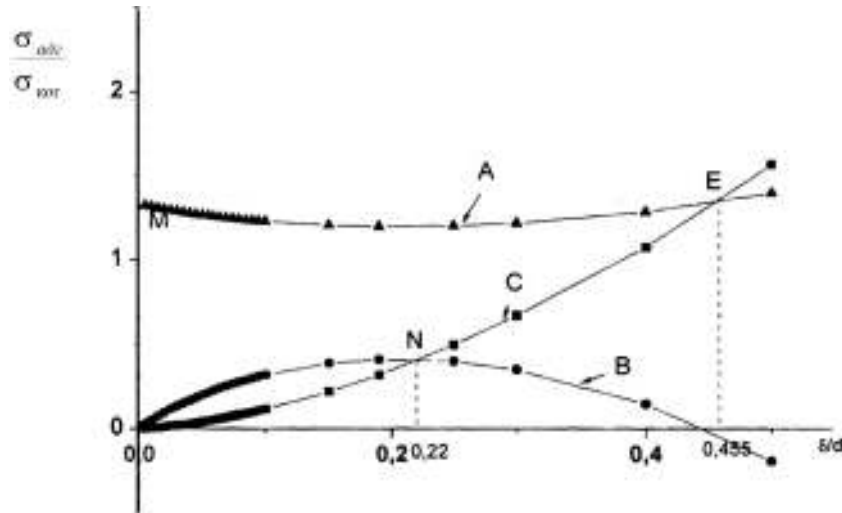


Рисунок 3. – Площадь неприлипания смеси при $a=4$

При $a=6$ формулы (5) и (6) примут следующий вид:

$$\frac{\sigma_{adg}}{\sigma_{kog}} < 1,2 - 2(x - 2y),$$

$$\frac{\sigma_{adg}}{\sigma_{kog}} > 10(x - 2y).$$

В этом случае площадь разрушения, находящаяся в площади прилипания, будет находится в пределах $0,28 \leq \frac{\delta}{d} < 0,42$.

Площадь неприлипания зависит от коэффициента «а». С его уменьшением эта область расширяется и, соответственно, увеличивается значение интервала отношения $\frac{\delta}{d}$. Это, в свою очередь, дает возможность расширения диапазона состава формовочной смеси. Например, при $a=6$ и $0,28 \leq \frac{\delta}{d} < 0,42$ смесь не будет разрушаться и прилипать.

$$a=3(0,22 \leq \frac{\delta}{d} < 0,455), a=2,6(0,17 \leq \frac{\delta}{d} < 0,5), a=2(0,039 \leq \frac{\delta}{d} < 0,82),$$

$$a=1,5(0,005 \leq \frac{\delta}{d} < 0,366), a=1,22(0,009 \leq \frac{\delta}{d} < 1,3).$$

Это видно из рис. 1, 2 и 3.

Теперь рассмотрим второй случай, когда все слои смеси имеют плотную упаковку ($K=12$).

Для слоя смеси, находящийся в контакте с материалом модели, уравнение будет иметь вид:

$$\sigma_{cm12} = 1,15\pi \left\{ 0,5\sigma_{adg} + \sigma_{kog} \left[\frac{\delta}{d} \left(1 + \frac{\delta}{d} \right) - 3 \left(\frac{1}{2} + \frac{\delta}{d} \right)^2 \left(\frac{\phi}{180} - \frac{\sin \phi}{\pi} \right) \right] \right\},$$

$$\sigma_{cm12}^{mod} = 1,15\pi \left\{ 0,5(\sigma_{adg} - \sigma_{adg}^{mod}) + \sigma_{kog} \left[\frac{\delta}{d} \left(1 + \frac{\delta}{d} \right) - 3 \left(\frac{1}{2} + \frac{\delta}{d} \right)^2 \left(\frac{\phi}{180} - \frac{\sin \phi}{\pi} \right) \right] \right\}. (8)$$

В соответствии с принятыми обозначениями формулы примут вид:

$$\sigma_{см12} = 1,15\pi [0,5\sigma_{адз} + \sigma_{коз}(x - 3y)], \quad (9)$$

$$\sigma_{см12}^{mod} = 1,15\pi [0,5(\sigma_{адз} - \sigma_{адз}^{mod}) + \sigma_{коз}(x - 3y)]. \quad (10)$$

Здесь $\sigma_{см12}^{mod}$ – предел прочности соля, находящегося в контакте с моделью; $\sigma_{см12}$ – предел прочности других слоев.

Обозначим, что:

$$\frac{\sigma_{см12}}{\sigma_{см12}^{mod}} = a$$

тогда

$$\sigma_{см12} = a \cdot \sigma_{см12}^{mod}.$$

Для определения площади прилипания преобразует последние равенства:

$$\begin{aligned} 1,15[0,5\sigma_{адз} + \sigma_{коз}(x - 3y)] &= 1,15 \cdot a \cdot \pi [0,5(\sigma_{адз} - \sigma_{адз}^{mod}) + \sigma_{коз}(x - 3y)], \\ 0,5\sigma_{адз} + \sigma_{коз}(x - 3y) &= 0,5 \cdot a \cdot \sigma_{адз} - 0,5 \cdot a \cdot \sigma_{адз}^{mod} + a \cdot \sigma_{коз}(x - 3y), \\ 0,5a \cdot \sigma_{адз}^{mod} &= 0,5 \cdot a \cdot \sigma_{адз} + a \cdot \sigma_{коз}(x - 3y) - 0,5\sigma_{адз} - \sigma_{коз}(x - 3y), \\ 0,5a \cdot \sigma_{адз}^{mod} &= 0,5 \cdot a \cdot \sigma_{адз} + a \cdot \sigma_{коз}(x - 3y) - 0,5\sigma_{адз} - \sigma_{коз}(x - 3y), \\ \sigma_{адз}^{mod} &= \sigma_{адз} + 2 \cdot \sigma_{коз}(x - 3y) - \frac{\sigma_{адз}}{a} - \frac{2 \cdot \sigma_{коз}(x - 3y)}{a}, \\ \sigma_{адз}^{mod} &= 1 + \frac{2 \cdot \sigma_{коз}(x - 3y)}{\sigma_{адз}} - \frac{1}{a} \cdot 1 + \frac{2 \cdot \sigma_{коз}(x - 3y)}{a \cdot \sigma_{адз}}, \\ \frac{\sigma_{адз}^{mod}}{\sigma_{адз}} &= \frac{a - 1}{a} + \frac{2\sigma_{коз}}{\sigma_{адз}} \left[(x - 3y) - \frac{(x - 3y)}{a} \right], \\ \frac{\sigma_{адз}^{mod}}{\sigma_{адз}} &= \frac{a - 1}{a} + \frac{2\sigma_{коз}}{\sigma_{адз}} \cdot \frac{a - 1}{a} (x - 3y). \end{aligned} \quad (11)$$

При $\frac{\sigma_{адз}}{\sigma_{адз}} \geq 1$ будет происходить прилипание к модели тонкого слоя связующего. Найдем условия для случая отсутствия прилипания. Видно, что прилипания не будет при следующих условиях:

$$\frac{\sigma_{адз}^{mod}}{\sigma_{адз}} < 1 \quad (a)$$

и

$$\frac{\sigma_{адз}^{mod}}{\sigma_{коз}} < 1. \quad (б)$$

Рассмотрим первое условие неприлипания $-(\frac{\sigma_{адз}^{mod}}{\sigma} < 1)$. Из формулы (11) видно, что:

$$\frac{a - 1}{a} \left[1 + \frac{2\sigma_{коз}}{\sigma_{адз}} (x - 3y) \right] < 1, \quad \left(\frac{\sigma_{адз}}{\sigma_{коз}} \right) > 0.$$

После преобразований получим:

$$\frac{\sigma_{ad\epsilon}}{\sigma_{kog}} > 2(a-1)(x-3y). \quad (12)$$

Используя это уравнение, изменим второе условие неприлипаемости:

$$\frac{\sigma_{ad\epsilon}^{mod}}{\sigma_{ad\epsilon}} = \frac{\sigma_{ad\epsilon}}{\sigma_{kog}} + 2(x-3y) - \frac{2(x-3y)}{a} < 1, \quad (13)$$

$$\frac{\sigma_{ad\epsilon}}{\sigma_{kog}} < \frac{a}{a-1} - 2(x-3y). \quad (14)$$

Таким образом, условия неприлипания выражаются следующим неравенствами:

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_{ad\epsilon}}{\sigma_{kog}} &< \frac{a}{a-1} - 2(x-3y), \\ \frac{\sigma_{ad\epsilon}}{\sigma_{kog}} &> 2(a-1)(x-3y). \end{aligned} \quad (15)$$

Площадь неприлипаемости будет располагаться между кривыми, описываемыми уравнениями:

$$\frac{\sigma_{adg}}{\sigma_{kog}} = \frac{a}{a-1} - 2(x-3y), \quad (A)$$

$$\frac{\sigma_{adg}}{\sigma_{kog}} = 2(a-1)(x-3y). \quad (B)$$

При $a=1,2$ площадь неприлипаемости выражается неравенствами:

$$\frac{\sigma_{ad\epsilon}}{\sigma_{kog}} < 6 - 2x + 6y, \quad \frac{\sigma_{ad\epsilon}}{\sigma_{kog}} > 0,4x - 1,2y.$$

Площадь неразрушения на рис. 4 существует на площади неприлипания в пределах $0,005 \leq \frac{\delta}{d} < 0,75$.

При $a=1,5$ площадь неприлипаемости выражается неравенствами:

$$\frac{\sigma_{ad\epsilon}}{\sigma_{kog}} < 3 - 2x + 6y,$$

$$\frac{\sigma_{ad\epsilon}}{\sigma_{kog}} > x - 3y.$$

При $a=1,5$ и площади неприлипания формовочной смеси площадь неразрушения смеси НЕ находится в площади прилипания пределах $0,005 \leq \frac{\delta}{d} < 0,45$.

Находим площадь неприлипания при $a=2$:

$$\frac{\sigma_{ad\epsilon}}{\sigma_{kog}} < 2 - 2x + 6y,$$

$$\frac{\sigma_{ad\epsilon}}{\sigma_{kog}} > 2x - 6y.$$

В это время площадь неприлипания находится в пределах $0,005 \leq \frac{\delta}{d} < 0,33$, а кривая Лясса ограничивается (с).

При $a=2,6$ площадь неприлипания выражается неравенствами:

$$\frac{\sigma_{ad\delta}}{\sigma_{kog}} < 1,625 - 2x + 6y,$$

$$\frac{\sigma_{ad\delta}}{\sigma_{kog}} > 3,2x - 9,6y.$$

При $a=2,6$ площадь неразрушения находится в пределах $0,005 \leq \frac{\delta}{d} < 0,28$ (рис.5).

Найдем площадь неприлипания при $a=3$:

$$\frac{\sigma_{ad\delta}}{\sigma_{kog}} < 1,5 - 2x + 6y,$$

$$\frac{\sigma_{ad\delta}}{\sigma_{kog}} > 4x - 12y.$$

При $a=3$ площадь неразрушения смеси находится в площади неприлипания в пределах $0,009 \leq \frac{\delta}{d} < 0,26$.

При $a=4$ площадь неприлипаемости смеси описывается следующими неравенствами:

$$\frac{\sigma_{adg}}{\sigma_{kog}} < 1,33 - 2x + 6y,$$

$$\frac{\sigma_{adg}}{\sigma_{kog}} > 6x - 18y.$$

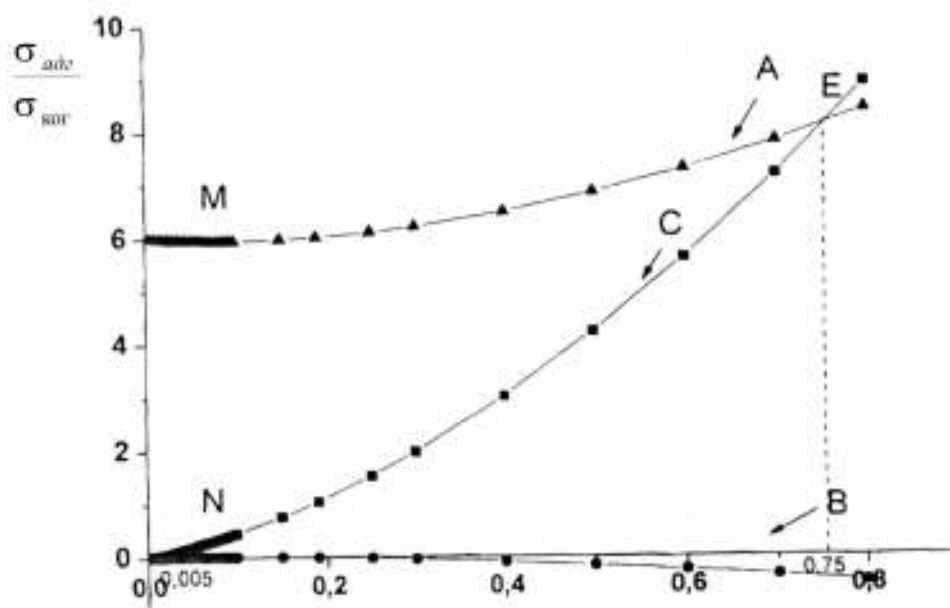


Рисунок 4. – Площадь неприлипания формовочной смеси при $a=1,2$

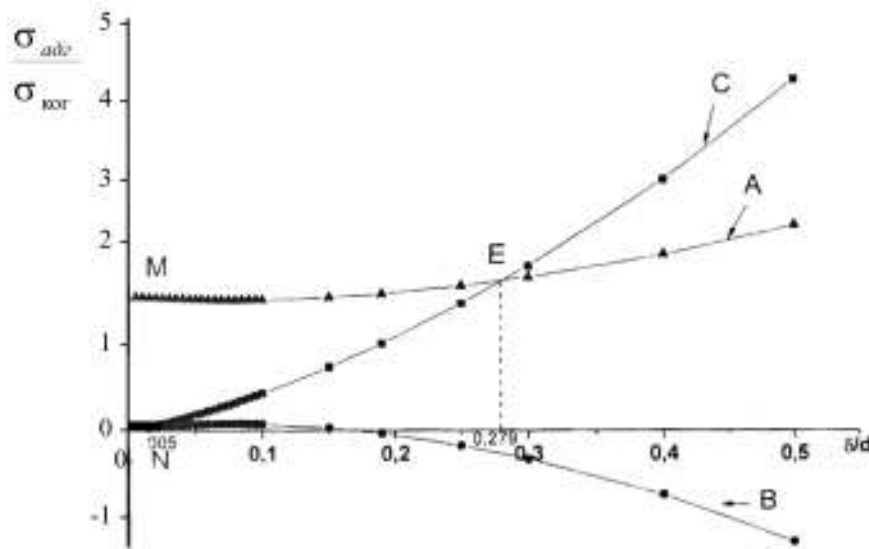


Рисунок 5. – Площадь неприлипания формовочной смеси при $a=2,6$

Таблица

Площадь неразрушения смеси в площадях неприлипания

Коэффициент «а»	Площадь неразрушения NE в площади неприлипания для δ/d	
	K=6	K=12
1,2	$0,09 \leq \delta/d < 1,3$	$0,005 \leq \delta/d < 0,75$
1,5	$0,039 \leq \delta/d < 0,82$	$0,005 \leq \delta/d < 0,45$
2,0	$0,092 \leq \delta/d < 0,62$	$0,005 \leq \delta/d < 0,33$
2,6	$0,14 \leq \delta/d < 0,52$	$0,005 \leq \delta/d < 0,28$
3,0	$0,17 \leq \delta/d < 0,5$	$0,009 \leq \delta/d < 0,26$
4,0	$0,22 \leq \delta/d < 0,45$	$0,029 \leq \delta/d < 0,23$
6,0	$0,28 \leq \delta/d < 0,42$	$0,062 \leq \delta/d < 0,22$

Из рис. 6 видно, что при $a=4$ площадь неразрушения смеси находится в площади неприлипания в пределах $0,14 \leq \frac{\delta}{d} < 0,52$.

Таким образом, сравнивая площади, можно выявить, что с уменьшением предела адгезионной прочности к материалу модели и соответственно значением коэффициента «а» увеличивается площадь неразрушения, выражается кривой NE. И увеличивается число рецептур формовочных смесей, зависящих от отношения $\frac{\delta}{d}$.

С целью определения прилипаемости песчано-глинистой смеси к поверхности модели необходимо для различных рецептур определить значение отношения $\frac{\delta}{d}$.

Для этого А. М. Лясс предлагает формулу

$$\frac{\delta}{d} = \frac{Q_{\ast}}{6\rho}$$

где $G_{св}=m_{св}/V_{св}$ – масса связующего в единице объема смеси;

$\rho_{св} = \frac{m_{св}}{V_{св}}$ – плотность связующего, Т/м³.

Предложенную формулу можно представить в виде отношений масс копонентов, входящих в состав смеси:

$$\frac{\delta}{d} = \frac{m_{св}}{6V_{св} \frac{m_{св}}{V_{св}}} = \frac{V_{св}}{6V_{св}}, \quad (16)$$

где $V_{св} - \rho_{св}$ – объем следующего, имеющего плотность.

$$V_{см} = V_{гл} + V_{вода}$$

$V_{гл}$ – объем глины, имеющей плотность $\rho_{гл}$;

$V_{вода}$ – объем воды, имеющей плотность $\rho_{вода}$;

$V_{см}$ – объем смеси, имеющей плотность $\rho_{см}$.

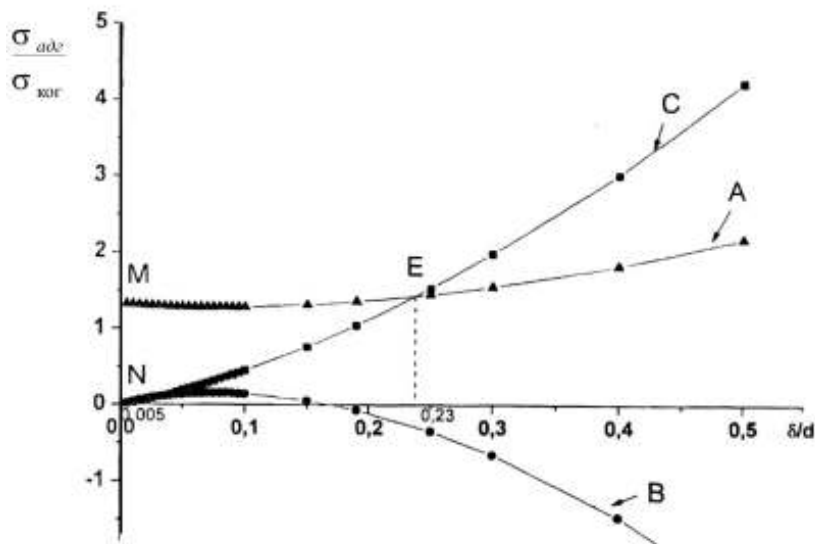


Рисунок 6. – Площадь неприлипаемости формовочной смеси при $a=3$

$$V_{см} = V_{пес} + V_{гл} + V_{вода},$$

$V_{пес}$ – объем песка, имеющего плотность $\rho_{пес}$.

Возьмем наиболее применяемые рецептуры песчано-глинистых смесей для влажных форм и определим для них отношение $\frac{\delta}{d}$ для различных

степеней упаковки. Согласно Б. Б. Гуляеву [2] для огнеупорного наполнителя плотностью $2,65 \text{ Т/м}^3$, зерна которого кубически упакованы ($K=6$), пористость составляет $0,467$, а плотность $1,3 \text{ Т/м}^3$. При плотной упаковке ($K=12$) пористость составляет $0,259$, а плотность $-1,85 \text{ Т/м}^3$.

Рецептура песчано-глинистой смеси показана ниже, масс. %: кварцевый песок (огнеупорный наполнитель) – 90; глина огнеупорная – 5; вода – 5.

Для кубически упакованных зерен ($K=6$) получим:

$$V_{\text{пес}} = \frac{0,9 \cdot m}{1,3} = 0,69 \cdot m;$$

$$V_{\text{гл}} = \frac{0,05 \cdot m}{2,5} = 0,02 \cdot m;$$

$$V_{\text{вода}} = \frac{0,05 \cdot m}{1,0} = 0,05 \cdot m.$$

$$V_{\text{см}} = (0,69 + 0,02 + 0,05) \cdot m = 0,76 \cdot m.$$

Здесь m – масса смеси, Т.

Подставляя полученные значения в формулу (16) получим:

$$\frac{\delta}{d} = \frac{V_{\text{доб}}}{6V_{\text{см}}} = \frac{(0,02 + 0,05) \cdot m}{6 \cdot 0,76m} = 0,0153.$$

Аналогично для $K=12$ получим:

$$V_{\text{пес}} = \frac{0,9 \cdot m}{1,85} = 0,48 \cdot m;$$

$$V_{\text{гл}} = \frac{0,05 \cdot m}{2,5} = 0,02 \cdot m;$$

$$V_{\text{вода}} = \frac{0,05 \cdot m}{1,0} = 0,05 \cdot m.$$

$$V_{\text{см}} = (0,48 + 0,02 + 0,05) \cdot m = 0,55 \cdot m.$$

Тогда:

$$\frac{\delta}{d} = \frac{V_{\text{доб}}}{6V_{\text{см}}} = \frac{(0,02 + 0,05) \cdot m}{6 \cdot 0,55m} = 0,0201$$

Из таблицы следует, что формовочная смесь будет прилипать к поверхности модели в случае $a=1,2$ и малых значениях адгезионных сил.

Для плотный пирамидальный упаковки ($k=12$) и $\frac{\delta}{d}=0,0201$ неприлипание смеси не будет при $a=1,2 \div 3$.

Вторая рецептура смеси, масс. %:

- кварцевый песок (огнеупорный наполнитель) – 85;
- огнеупорная глина – 10;
- вода – 5.

При кубической упаковке ($K=6$) отношение $\frac{\delta}{d}=0,02$, и аналогично при ($K=12$) $\frac{\delta}{d} = 0,037$. Сравнивая полученные результаты с условиями

неприлипания, можно определить, что при кубической упаковке зерен наполнителя заданной песчано-глинистой смеси. Она не будет прилипать к модели при $a=1,2$, т.е. в интервале $(0,009 \leq \frac{\delta}{d} = 1,3)$.

В случае пирамидальной плотной упаковки отношение $\frac{\delta}{d} = 0,02$ попадает в интервал площади неприлипания $A=1,2-3$. таким образом, повышая плотность упаковки зерен смеси можно повышать ее плотность и соответственно уменьшать возможность прилипания к поверхности оснастки.

Рассмотрим случай для смеси следующего состава, масс. %: кварцевый песок (огнеупорный наполнитель) – 80; огнеупорная глина – 12; вода – 8.

Проведенные расчеты показывают, что отношение толщины пленки к диаметру зерен для кубической упаковки ($K=6$) составляет $\frac{\delta}{d} = 0,0287$, а для пирамидальной упаковки ($K=12$) – $\frac{\delta}{d} = 0,038$.

Сравнивая эти цифры с табличными, можно отметить, что формовочная смесь не будет прилипать к поверхности модели только в случае малых адгезионных сил, т.е. при $K=6$, $a=1,2$ и $K=12$, $a=12,-4$.

Выводы

1. Повышая плотность упаковки зерен формовочной смеси от $K=6$ до $K=12$ при высоких адгезионных силах, можно увеличить число случаев неприлипания смеси к поверхности модельной оснастки даже при значениях коэффициента $a=4$.

2. Уменьшение адгезионных сил к поверхности модели, можно достигнуть использованием соответствующих материалов для модели и покрытий, уменьшающих коэффициент «а», повышением степени упаковки зерен формовочной смеси, а также повышением ее прочностных показателей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Васин Ю. П. Прилипаемость формовочных смесей к оснастке / Ю. П. Васин. – Процессы литья. – 1993. – №2. – С. 129-134.
2. Гуляев Б. Б. Формовочные процессы / Б. Б. Гуляев, О. А. Корнюшкин, А. В. Кузин. – Л. : Машиностроение, 1987. – 264 с.
3. Баландин Г. Ф. Основы формирования отливки / Г. Ф. Баландин. – М. : Машиностроение, 1979. – 335 с.
4. Лясс А. М. Быстротвердеющие формовочные смеси / А. М. Лясс. – М. : Машиностроение, 2005. – 329 с.
5. Жуковский С. С. Прочность литейной формы / С. С. Жуковский. – М. : Машиностроение, 2002. – 288 с.
6. Исмаилов Н. Ш. Литейные формы из местных материалов / Н. Ш. Исмаилов. – Баку : Элм, 2007. – 230 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ КАРБИДНЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРОННОЙ МИКРОСКОПИИ

Аннотация. Работа посвящена изучению закономерностей фазовых превращений в метастабильных эвтектических карбидах сталей карбидного класса типа Р6М5 и белых чугунах. Результаты комплексных исследований методами световой и электронной микроскопии, рентгеноструктурного и микрорентгеноспектрального анализа позволили установить последовательность карбидных превращений в эвтектической составляющей для управления структурой и свойствами этих сплавов.

Ключевые слова: быстрорежущие стали, белые чугуны, эвтектика, метастабильные карбиды, электронная микроскопия, фазовые превращения, дисперсные фазы.

В статті наведено результати комплексних досліджень вольфрамомолібденових швидкорізальних сталей та білих ледебуритних чавунів, що леговані ванадієм. Застосування спеціальних методів травлення зразків дозволило використати растрову електронну мікроскопію для вивчення закономірностей фазових перетворень в метастабільних евтектичних карбідах. У роботі вдалось виявити мілко дисперсні кристали карбідів МС при дослідженні вугільних реплік, що були зняті з поверхні зразків сталі Р6М5, які піддавались електролітичному травленню, а також спостерігати стадії розпаду легованого ванадієм цементиту за допомогою растрової електронної мікроскопії.

Швидкорізальні сталі, білі чавуни, евтектика, метастабільні карбіди, електронна мікроскопія, фазові перетворення, дисперсні фази.

Results of complex researches of rapid tool tungsten-molybdenum steel and vanadium white ledeburite cast-irons are in this article. The sequence of the phase transformations into metastable eutectic carbides was studied due to the special methods of etch of standards and raster electronic microscopy. Dispersible crystals carbides MC were discovered at research of coal replicas. These replicas were taken off from the surface of standards P6M5 became an electrolytic method. The stages of disintegration of cementite, that contained vanadium, were certain by means of stereoscopic scanning electronic microscopy.

Rapid tool steels, white cast-irons, eutectic, metastable carbides, electronic microscopy, phase transformations, dispersible phases.

Постановка проблемы. Стали и сплавы карбидного класса широко используются в качестве материалов с повышенной износостойкостью. К ним относятся белые чугуны и инструментальные стали, легированные хромом, молибденом, вольфрамом, ванадием и другими карбидообразующими элементами. В промышленности в основном используются сплавы доэвтектических составов. В литом состоянии структура таких сплавов состоит из первичных кристаллов твердого раствора и сетки эвтектической составляющей. Технологические и эксплуатационные свойства сплавов данного класса обусловлены, прежде всего, наличием эвтектик, у которых базовой является хрупкая карбидная

фаза. В структуре этих сплавов образуются эвтектики на базе метастабильных карбидов сложного состава M_7C_3 , M_6C , M_2C , M_3C , MC . В метастабильных карбидах при тепловом воздействии происходят фазовые превращения, направленные на переход в более стабильное состояние. При этом структура может существенно изменяться вплоть до полного разделения эвтектической сетки на изолированные карбидные включения. Изучение закономерностей карбидных превращений в эвтектической составляющей, представляет огромный научный и практический интерес, так как позволяет управлять структурообразованием и свойствами белых чугунов и сталей карбидного класса.

Анализ последних исследований. Белые чугуны и стали карбидного класса являются структурными аналогами. Эвтектическая составляющая вольфрамо-молибденовых сталей весьма разнообразна. Наиболее часто в структуре сталей типа Р6М5 встречается пластинчатая эвтектика. Она же является наименее желательной с точки зрения пластичности стали [1-3]. В то же время использование карбидных превращений в ледебурите может существенно повысить пластичность белых чугунов [4]. Поэтому особенно важны превращения, изменяющие структуру этих составляющих.

Формулировка цели статьи. Целью настоящей работы является исследование структурных и фазовых изменений в эвтектиках высокоуглеродистых сталей и доэвтектических белых чугунов, легированных карбидообразующими элементами: хромом, молибденом, вольфрамом, ванадием в количестве от 0,5 до 12% масс.

Материал и методика. В работе изучали фазовые превращения в сталях и чугунах, структурные характеристики которых представлены в табл.1. Содержание серы, фосфора и других примесей не превышало значений, регламентированных ГОСТом 19265-73. Образцы сталей №1-5 получали из промышленных слитков различных плавок, а сплавы 6-7 выплавляли в лабораторных условиях в печи ЛВП-3, при этом использовали промышленные ферросплавы, доменный чугун и сталь 10.

Таблица 1

Содержание легирующих элементов и
эвтектической составляющей в экспериментальных сплавах

№	Содержание легирующих элементов, % масс.					Доля эвтектической составляющей, %				
	C	W	Mo	V	Cr	Пластинчатая	Стержневая	Скелетная	Ванад./карбидн.	Ледебурит
1	0,83	5,81	5,31	3,34	3,91	55	30	5	10	
2	0,74	6,29	5,11	2,11	3,86	60	20	10	10	
3	0,97	6,12	5,21	2,06	4,21	60	25	5	10	
4	1,25	6,01	5,25	1,87	4,07	70	20	10	-	
5	1,15	6,08	5,20	2,34	4,11	85	5	5	5	100
6	3,21	-	-	-	0,78	-	-	-	-	100
7	1,98	-	-	1,55	0,65	-	-	-	5	95
8	2,67	-	-	3,54	0,76	-	-	-	30	70

Микроструктурные исследования проводили с помощью оптических микроскопов "VERTIVAL", "AXIOVERT 200 MAT", "AXIO OBSERVER AL"

фирмы "CarlZeiss" , "AXIOMAT" фирмы "OPTON" (Германия), а также на растровых электронных микроскопах "JSM-35" фирмы "JEOL"(Япония), "AMREY 3600–С ECO-SEM" фирмы "AMREY"(США). Микроструктуру выявляли путем различных видов травления: теплового, химического, электролитического, ионного.

Результаты исследований. В структуре исследуемых сталей, эвтектическая составляющая представлена в основном четырьмя типами: ванадиевокарбидной, на базе карбида MC , скелетной на базе карбида M_6C , пластиночной и стержневой, базовым карбидом которых является метастабильный карбид M_2C [1,2].

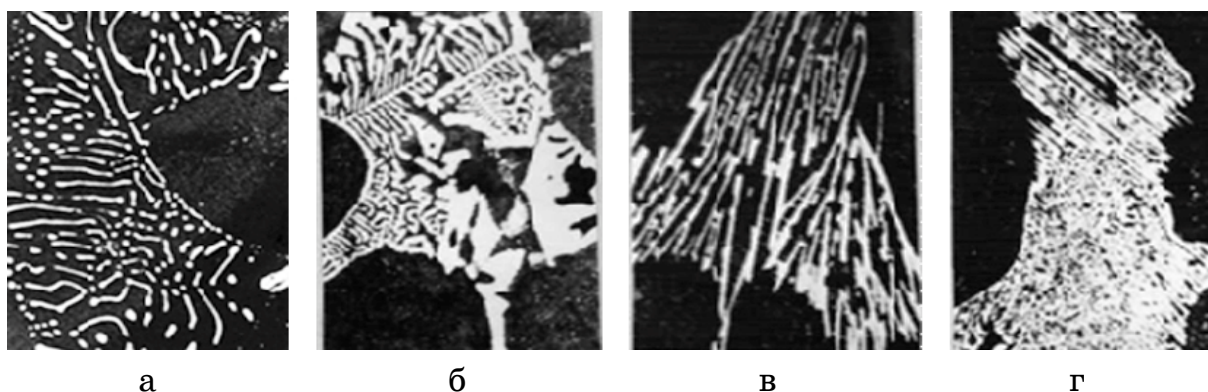


Рисунок 1. - Типы эвтектик в быстрорежущих сталях типа Р6М5:
а - ванадиевокарбидная; б- скелетная; в- пластиночная; г- стержневая

Базовый карбид пластиночной и стержневой эвтектик M_2C во всех исследуемых сталях при высокотемпературном отжиге распадается с образованием карбидов M_6C и MC . Анализируя составы фаз, это превращение можно записать как следующую реакцию[1,2]:

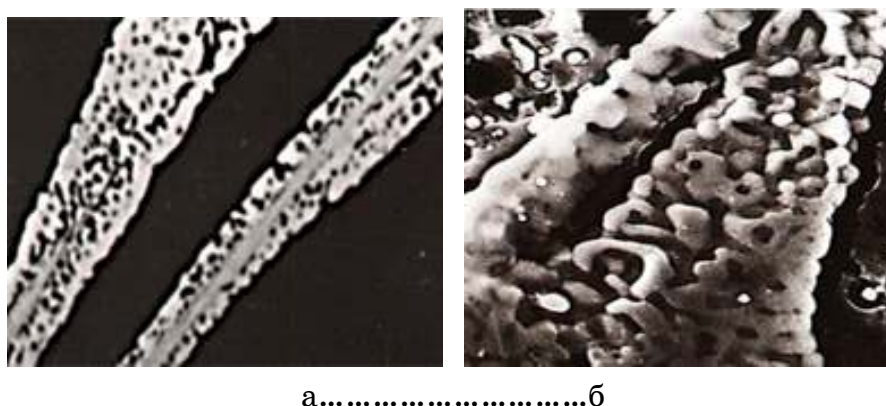


Рисунок 2. - Карбидное превращение в эвтектическом карбиде M_2C стали Р6М5 после выдержке 30 мин при 1220°С:
а-световая микроскопия, 1000; б- РЭМ, 3000

Превращение начинается зарождением карбидов M_6C на поверхности карбида M_2C с аустенитом и постепенно продвигается к центру пластины. При этом на границе исходного карбида и вновь образовавшегося выделяются кристаллы VC . Послойную перекристаллизацию M_2C в M_6C можно зафиксировать с помощью световой микроскопии (рис.2 а).

На фотографии видно, что слой от слоя карбидов M_6C отделен карбидами VC . Однако с помощью растровой электронной микроскопии глубокотравленных образцов, в которых часть карбида M_6C удалена и оголен каркас из карбида ванадия, удалось установить непрерывность фазы MC (рис.2б).

При увеличении длительности высокотемпературной выдержки происходит деление карбидных агрегатов, сфероидизация и коалесценция продуктов распада (рис.3а). Завершение карбидного превращения приводит к уменьшению монолитности эвтектической сетки, что способствует повышению пластичности стали (рис.3б).

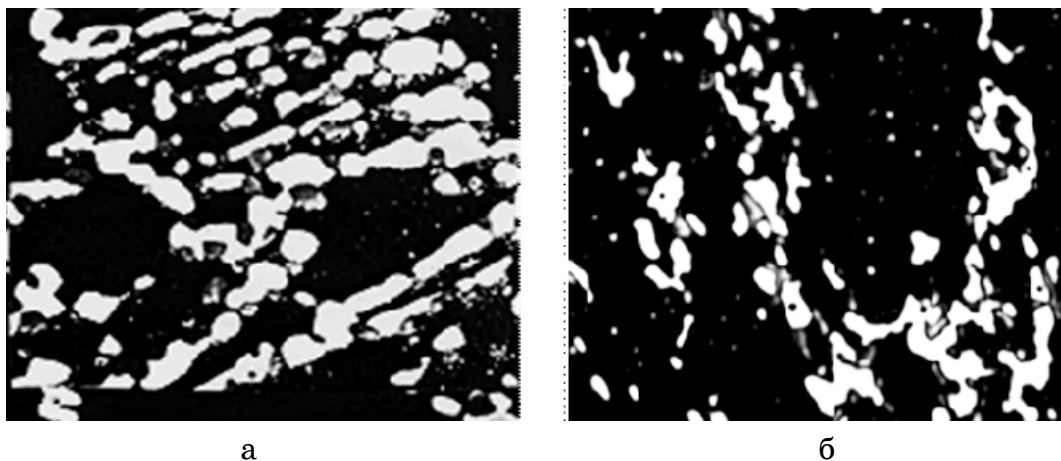


Рисунок 3. - Изменение структуры пластинчатой эвтектики стали Р6М5, при завершении карбидного превращения:
а-после выдержки при 1220°С, 10час;
б- после горячей деформации отожженных образцов, 1200

Электронно - микроскопические исследования угольных реплик, снятых с поверхности электролитически растравленных образцов позволили установить особенности структурообразования в изучаемой эвтектике при относительно низких температурах (рис.4). При нагреве ниже 900°С образование новых фаз обнаружено не было (рис.4а). При 900-950°С на угольных репликах обнаруживаются дисперсные выделения, которые равномерно распределяются по всему сечению исходных карбидов. Размер выделений составляет 0,1...0,2 мкм (рис.4б, в). С увеличением длительности выдержки и повышением температуры структура грубеет, а рельеф становится более отчетливым (рис.4,г). С помощью рентгеноструктурного анализа было доказано, что эта мелкодисперсная фаза представляет собой карбиды ванадия MC .

Подобное выделение мелкодисперсных карбидов наблюдается и в эвтектическом цементите белых чугунов, легированном карбидообразующими элементами. Хром, молибден, вольфрам и ванадий образуют с карбидом железа твердые растворы. При тепловом воздействии в карбиде M_3C наблюдаются превращения, квалифицируемые как различные этапы выделения избыточных фаз из пересыщенных твердых растворов.

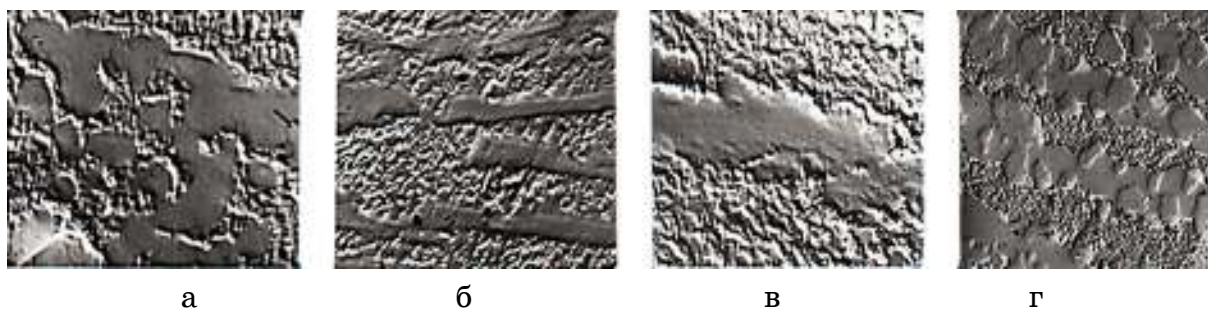


Рисунок 4. – Структура эвтектических карбидов M_2C после высокотемпературной выдержки, ПЭМ, Ч10 000:

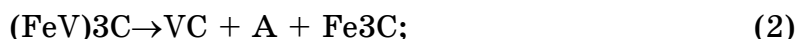
а- при 850°C 5 час.; б- при 900°C 5 час ;

в- при 900°C 10час; г- при 950°C 10час

Эти превращения имеют свои особенности в каждом отдельном случае [2,4].

В данной работе исследовали закономерности структурообразования в ледебуритных белых чугунах, содержащих

1,98...3,21% C и 1,55...3,54% V. Данные микроструктурного и рентгеноструктурного анализа позволили установить, что в цементите этих сплавов происходит превращение:

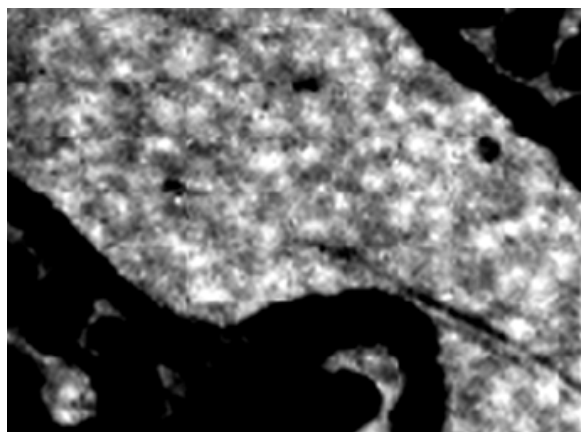


Первоначально при нагреве наблюдается расслоение, которое выявляется при использовании как оптической (рис.5а, б), так и электронной микроскопии (рис.5в-е). Использование режима фазового контраста в растровом электронном микроскопе JSM-35 фирмы «JEOL» (рис. 5,в) позволило доказать, что зоны карбида, которые на (рис. 5а, б) выглядят более светлыми, обогащены ванадием.

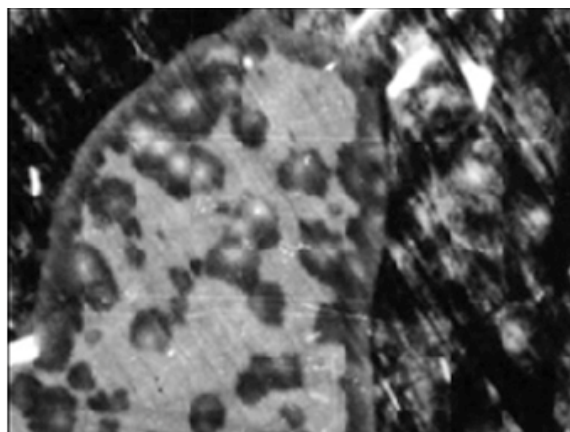
В работе удалось также провести исследования чугунных тонких фольг в колонне просвечивающего электронного микроскопа JEM -1000-9» (рис. 5,г,д,е).

Работа в режиме вторичных электронов требует большой рельефности поверхности образца. Глубокое травление цементита образцов подвергнутым различным тепловым обработкам позволило выявить и изучить структуру возникающего в карбиде $(Fe,V)_3C$ расслоения при увеличении 4000 и более (рис. 6). В кристалле легированного цементита формируются стержневые образования, имеющие когерентную границу с основной фазой. Расположение этих образований носит закономерный

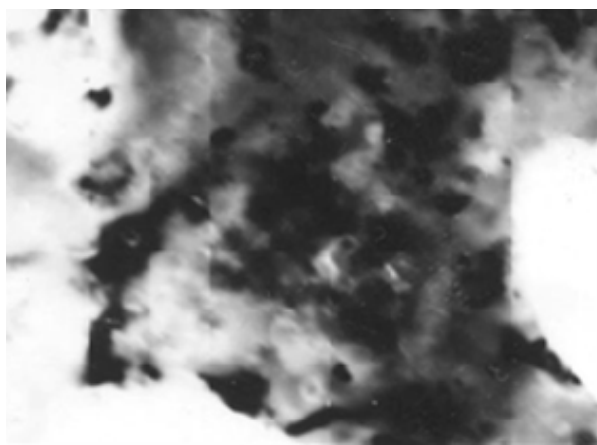
периодический характер и напоминает модулированную структуру, которая формируется на первых этапах старения твердых растворов.



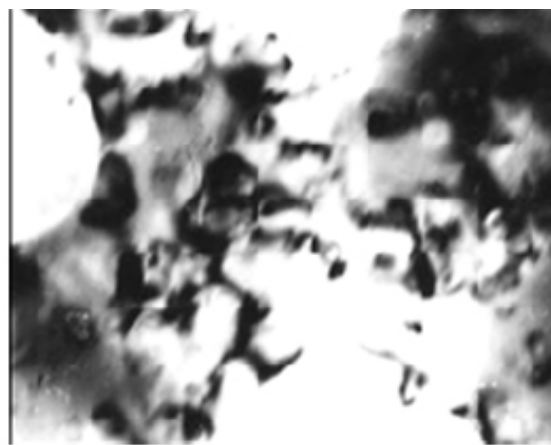
а



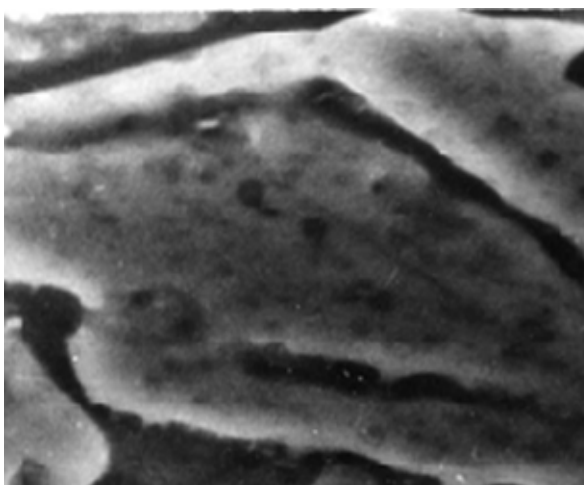
б



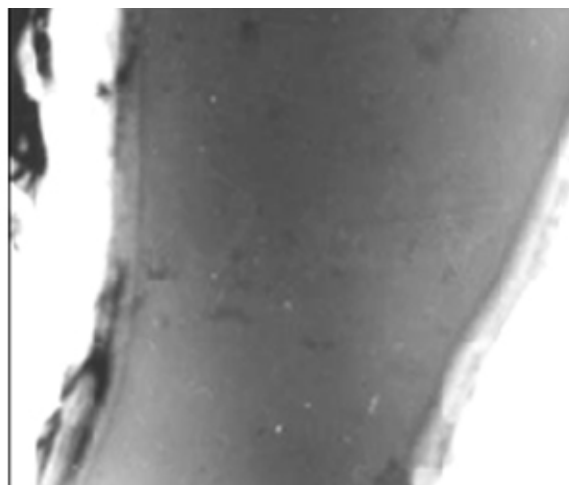
в



г



д



е

Рисунок 5. – Неоднородность в эвтектическом цементите, легированном ванадием: а,б – световая микроскопия, а – травление в кипящем растворе NaOH, б – тепловое травление, $\times 1500$; в – режим фазового контраста, $\times 2600$; г, д, е – просвечивающая электронная микроскопия, 7500

При исследовании структурных изменений в низколегированных (менее 0,5% вес хрома или ванадия) чугунах, в цементите выявлялась неоднородность, напоминающая расслоение в легированном цементите (рис.7), хотя весьма слабого контраста.

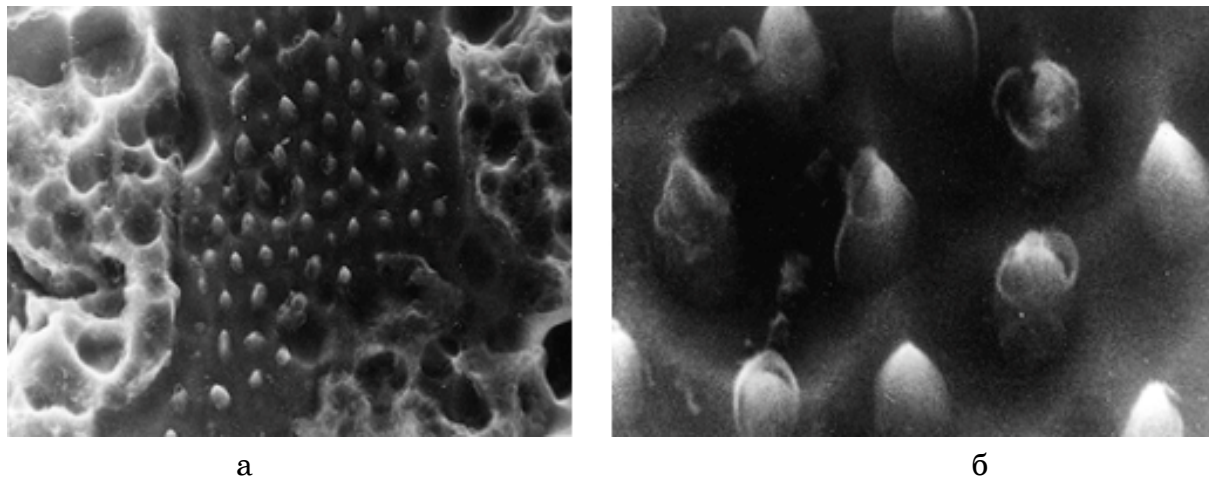


Рисунок 6. - Неоднородность в эвтектическом цементите, легированном ванадием - растровая электронная микроскопия:
а – 4000; б – 8000

Легирующие элементы могут усиливать или скорее структурировать в той или иной мере возникающее в цементите расслоение. Сопоставляя полученные в работе результаты микроструктурных исследований с анализом литературных сведений о разнообразии и структурной близости карбидов железа [3,4], имеющих различный химический состав и соответственно различную стехиометрию, можно интерпретировать наблюдаемые модулированные структуры в цементите, как расслоение по углероду, которое влечет за собой некоторые отклонения от закономерного расположения в решетке цементита атомов, и как следствие формирования в этих объемах иной кристаллической структуры, присущей одному из описанных более высокоуглеродистых карбидов. Введение карбидообразующих элементов в решетку Fe_3C может способствовать этой перестройке в том или ином направлении, то есть атомы замещения ванадия, хрома, молибдена, вольфрама, усиливая неоднородность, могут в зависимости от своей специфики и природы. способствовать образованию различных фаз предвыделения.

То есть, атомы замещения, внося искажения в решетку цементита, влияют на его стабильность и соответственно равновесное содержание углерода, увеличивая вероятность спинодального распада цементита как твердого раствора вычитания (то есть происходит перераспределение в расположении атомов углерода). Далее такое упорядочение влечет за собой и перераспределение примесных атомов, которые могут в свою очередь

[illegible]

Рисунок 7. - Неоднородность в цементите низколегированных
(до 0,5% Cr) чугунов после деформации и отжига:
а – тепловое травление,
* 8006 – травление в NaOH.*1200 (темные включения - FeS)

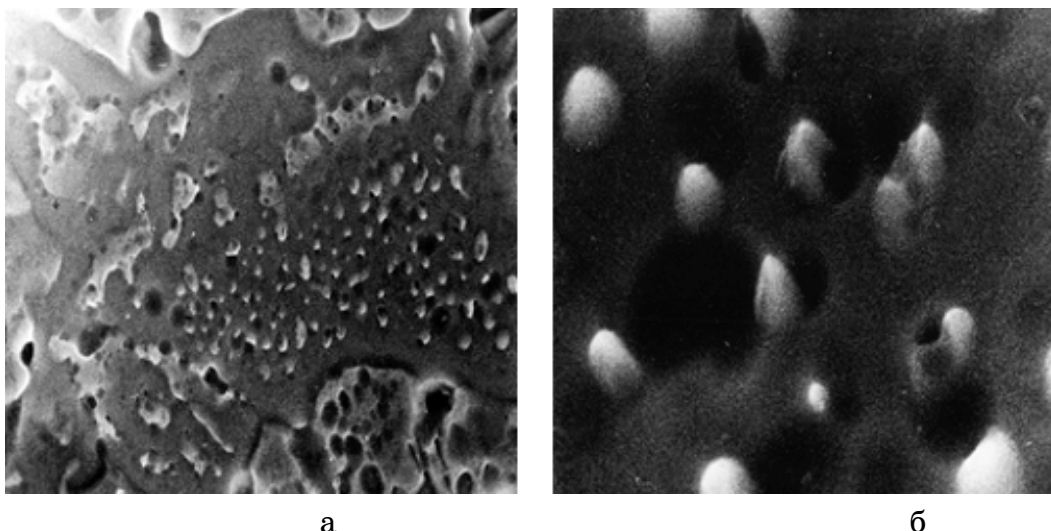


Рисунок 8. - Растровая электронная микроскопия
глубокораставленных образцов. Следы выделения карбидов VC
при расслоении в легированном цементите: а –4000; б –10000

Выделяющиеся из цементита карбиды ванадия имеют существенный дефицит по углероду, который восполняется доставкой атомов углерода из прилегающего к ним карбида $(\text{Fe}, \text{V})_3\text{C}$. Так как выравнивание химического состава в цементите осуществляется весьма медленно, то обедняющийся углеродом цементит с течением времени перестраивается в аустенит, образующий оболочки и прослойки вокруг карбидов ванадия.

Выводы

1. Применение электронной микроскопии позволило определить закономерности фазовых превращений в эвтектических карбидах пластинчатой эвтектики стали Р6М5: при выдержках выше 1150°C происходит послойная перекристаллизация карбида M_2C в M_6C и MC . При низкотемпературных выдержках в интервале $900-950^\circ\text{C}$ обнаружены дисперсные выделения MC , которые равномерно распределяются по всему сечению исходных карбидов.

2. С помощью растровой и просвещающей электронной микроскопии удалось установить стадии предвыделения при распаде пересыщенного карбидообразующими элементами цементита, однако эти превращения нельзя однозначно квалифицировать как процесс старения пересыщенного твердого раствора.

3. Фазовые превращения, происходящие в карбиде $(\text{Fe}, \text{V})_3\text{C}$ следует квалифицировать как переход к более стабильным карбидным формам, причем главной движущей силой является не степень легированности цементита как таковая, а повышение его метастабильности в том числе и за счет пересыщения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Нижниковская П.Ф., Современные представления о структурообразовании быстрорежущих сталей./ П.Ф. Нижниковская, Ю.Н. Таран - В кн.: Общегосударственные дни термической обработки: Международная конференция. Брно, 1984., С 52-54.

2. Нижниковская П.Ф. Карбидное превращение в эвектиках железоуглеродистых сплавов. /Известия АН СССР.- Металлы, 1982, №6, с.105-110
3. Карбидное превращение в литой стали Р6М5 при высокотемпературной обработке / Ю.Н.Таран, П.Ф. Нижниковская, О.Н. Гришина, Г.Ф. Демченко.- МиТОМ, 1976, №2, с.37-40.
4. Миронова Т. М. Структура и свойства деформируемых чугунов / Т.М.Миронова, В.З. Куцова. – Днепропетровск: Дриант, 2009. -190 с.
5. Структурные изменения в эвтектиках стали Р6М5 или горячей пластической деформации / Таран Ю.Н., Нижниковская П.Ф., Миронова Т.М. и др.- Известия вузов.Черная металлургия,1981, № 5, с.109-113.
6. К вопросу о составе и строении метастабильного карбида Me_2C в быстрорежущих сталях/ Ю.Н.Таран, П.Ф.Нижниковская, С.В.Вукелич, А.М. Нестеренко.- В кн.: Вопросы формирования метастабильной структуры сплавов. Днепропетровск,1982, с.76-81. (Межвузовский сборник научных трудов).

УДК 004.942:669.013.6

Г.Л. Євтушенко, О.І. Михальов, В.І. Кузнецов

СИСТЕМНА МОДЕЛЬ ДЛЯ БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ТЕХНОЛОГІЙ ВИКОРИСТАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ РЕСУРСІВ МЕТАЛУРГІЙНОГО ВИРОБНИЦТВА

Запропонована загальна концепція системної моделі, заснована на об'єднанні методів багатокритеріального аналізу та пошукової оптимізації у вирішенні проблеми раціонального використання вторинних енергетичних ресурсів металургійного виробництва.

Ключові слова: вторинні енергетичні ресурси металургійного виробництва, системне моделювання, методи багатокритеріального аналізу, пошукова оптимізація.

Предложена общая концепция системной модели, основанная на объединении методов многокритериального анализа и поисковой оптимизации в решении проблемы рационального использования вторичных энергетических ресурсов металлургического производства.

Ключевые слова: вторичные энергетические ресурсы металлургического производства, системное моделирование, методы многокритериального анализа, поисковая оптимизация.

There was proposed the general vision of system model to solve the issue of the rational recyclable energy resources use at the metallurgical production. It is based on the multiple-criteria decision analysis and optimal solutions search methods integration.

Key words: recyclable energy resources of the metallurgical production, system modeling, methods of multiple-criteria decision analysis, optimal solutions search.

Вступ

Чорна металургія являє собою сформовану галузь з добре відпрацьованими технологіями основного виробництва, заміна або істотна модернізація яких вимагає величезних капітальних витрат. Металургійне підприємство виробляє значні обсяги вторинних енергетичних ресурсів (ВЕР) – горючих газів, пару, тепла. Утилізація (використання) горючих і теплових ВЕР чорної металургії дозволяє економити більше 35...50% потреби галузі в теплоті. Наприклад, металургійний комбінат повного циклу потребує на рік близько 8 млн. т умовного палива, з них внутрішніми паливними ресурсами забезпечується 2.5 млн. т доменним газом та 1.5 млн. т коксовим [1, 2].

Разом з тим, проблема раціонального використання ВЕР металургії залишається актуальною в таких аспектах: виробничому, енергетичному, економічному, екологічному [1 ... 3]. Просування у вирішенні цієї проблеми дозволяє знизити споживання первинних енергоресурсів (природний газ, електроенергія) і зменшити обсяги забруднень і, враховуючи зростаючу вартість первинних енергоресурсів, отримати суттєвий економічний ефект [1 ... 3].

Математичне моделювання процесів розподілу та використання ВЕР дозволяє оптимізувати ці процеси, підвищити обґрунтованість проектних та організаційних рішень. Таке моделювання, враховуючи складність системи, повинне ґрунтуватися на методах системного аналізу та сучасних інформаційних технологіях [4, 5].

Багатокритеріальний аналіз (БКА) з використанням сучасних інформаційних технологій, реалізованих у вигляді системи підтримки прийняття рішень, дозволяє порівняти різні варіанти утилізації ВЕР з урахуванням всіх істотних чинників проблеми.

В [2] розроблена модель оптимального розподілу ВЕР за двома скалярними критеріями – енергетичним та економічним і показана можливість подальшого (приблизно на 15%) зниження потреб у зовнішніх енергетичних ресурсах – природному газі та електроенергії з ОЕС. Тим самим знижуються і витрати на придбання цих ресурсів.

Слід зазначити, що модель [2, гл.11] розроблена для стабільних зовнішніх умов – цін на ресурси та обсягів випуску основної продукції. Для сучасних умов більш характерні волатильність (мінливість) цих зовнішніх умов і невизначеності в їх змінах (ситуація невизначеності).

У фундаментальній роботі [3] розглянуті сучасний стан, проблеми і технології ресурсо- та енергозбереження, в тому числі і за рахунок раціонального використання ВЕР. Проаналізовано як традиційні, так і нові технології чорної металургії («металургія заліза»). Особливу увагу приділено екології, технологіям, що знижує забруднення. Представлена методологія вибору технології металургійного виробництва [3, гл. 12].

З точки зору багатокритеріального аналізу, ця методологія являє собою концепцію проблеми складного багатокритеріального вибору. Порівняння проводиться по 11 критеріям, показники альтернатив (тобто порівнюваних технологій) розраховуються за спеціальними методиками. Таким чином, аналіз показав, що в системну модель використання вторинних енергетичних ресурсів доцільно включити можливості векторної оптимізації з урахуванням варіантів зовнішніх умов для ситуацій невизначеності і ризику.

На основі аналізу проблеми нами сформульовані 3 завдання зростаючої складності: порівняльний багатокритеріальний аналіз заданих технологій; оптимізація розподілу ресурсів; порівняльний аналіз оптимізованих технологій.

Обґрунтовано застосування розроблених на кафедрі інформаційних технологій і систем Національної металургійної академії України інтегрованих методів БКА та системи підтримки прийняття рішень NooTron [6].

Вторинні енергетичні ресурси

Під вторинними енергетичними ресурсами (ВЕР) розуміють енергетичний потенціал продукції, відходів, побічних і проміжних

продуктів, що утворюються при технологічних процесах, в агрегатах і установках, який не використовується в самому агрегаті, але може бути частково або повністю використаний для енергозбереження інших агрегатів (процесів).

По виду енергії ВЕР поділяються на горючі (паливні), теплові та надлишкового тиску.

Горючі ВЕР – побічні газоподібні продукти технологічних процесів, які можуть бути використані в якості енергетичного або технологічного палива.

Теплові ВЕР – фізична теплота основних і побічних продуктів, відхідних газів технологічних агрегатів, а так само систем охолодження їх елементів.

ВЕР надлишкового тиску – потенційна енергія газів, що виходять з технологічних агрегатів з надлишковим тиском, яке може бути використане для інших видів енергії.

Загальні характеристики ВЕР та методи використання наведені в книгах [1...3].

Схематично класифікація вторинних енергетичних ресурсів, утилізація яких здійснюється на металургійних підприємствах, наведена на рис. 1 [3].



Рисунок 1. – Вторинні енергетичні ресурси металургійних підприємств

Системний підхід

Системний підхід до раціонального використання вторинних енергетичних ресурсів передбачає порівняльний аналіз існуючих технологічних схем і оптимізацію їх використання з урахуванням всіх істотних чинників.

Це можливо здійснити за допомогою методів багатокритеріального аналізу і системного моделювання. Тобто йдеться про багатокритеріальний порівняльний аналіз та багатокритеріальну (векторну) оптимізацію [4 ... 7].

Багатокритеріальний аналіз (БКА) – це практична реалізація структури системного дослідження у вирішенні складних, комплексних проблем. БКА забезпечує раціональний, систематизований і прозорий процес прийняття рішень при аналізі впливів і взаємозв'язків у складних системах. У багатокритеріальному аналізі порівнювані об'єкти називаються альтернативами. Під об'єктами розуміються як існуючі системи, технології, так і проекти. Критерій – кількісна або якісна характеристика, істотна для судження про об'єкт. Показник – кількісна або якісна оцінка оцінюваного об'єкта за певним критерієм.

Методів БКА розроблено досить багато, кожен з них має переваги, недоліки, обмеження і, відповідно, переважні сфери застосування. Ці методи поділяються на кількісні (кардинальні) і порядкові (ординальні) [5, 7, 8] .

Методи БКА використовуються для різноманітних завдань, для нас цікаві наступні: вибір кращої альтернативи, багатокритеріальна оптимізація, прийняття проектних рішень, оцінка ефективності. Ці методи трудомісткі, їх доцільно використовувати у складі комп'ютерної системи підтримки прийняття рішень (СППР) [7 ... 9].

Системна модель

Системне моделювання може бути охарактеризоване як інтерактивне моделювання із «вбудованими» в модель методами аналізу рішень (багатокритеріального аналізу) та оптимізації. Системна модель може бути коротко охарактеризована як інтерактивна модель, що використовує методи системного аналізу, знання проблемної області, інформаційні технології.

Найбільш універсальним методом аналізу та оптимізації складних систем є імітаційне моделювання. Аналіз існуючих підходів до побудови моделей (в імітаційному моделюванні вони називаються парадигмами) показав, що виходячи із специфіки предметної області, – виробництва та утилізації вторинних енергетичних ресурсів, – для цілей нашого дослідження найбільш підходить парадигма системної динаміки [4].

Аналіз проблем включає в себе методи багатокритеріального аналізу, які дозволяють проводити багатокритеріальну оптимізацію, порівнювати альтернативні варіанти (технології та схеми утилізації в нашому випадку) за сукупністю критеріїв, оцінювати ефективність проектів [5, 9]. Необхідною складовою системної моделі є інтерактивна взаємодія з дослідником. Це забезпечується СППР NooTron [6].

Структура системної моделі в цілому представлена на рис. 2. Зупинимося на складових моделі.

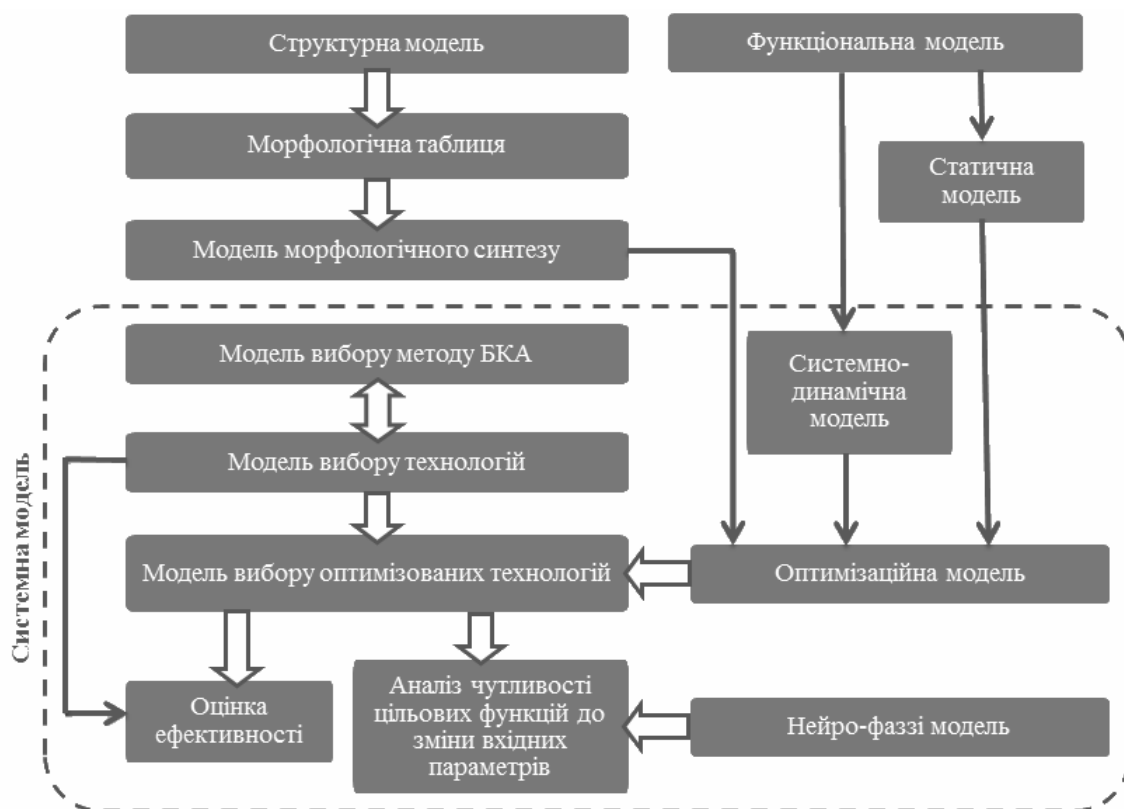


Рисунок 2. – Структура системної моделі

Основою структурної моделі є узагальнена модель металургійного підприємства повного циклу. Підприємство розглядається тільки (спрощення реальної предметної області) як споживач зовнішніх енергетичних ресурсів та генератор (виробник) внутрішніх енергетичних ресурсів, які використовуються всередині підприємства, а надлишок викидається в навколишнє середовище. Узагальнений характер моделі полягає в тому, що деякі етапи використання ВЕР можуть включатися в загальну модель та виключатися з неї так само як і варіанти використання ВЕР на кожному рівні.

Потоки ВЕР відповідають основним технологіям металургійного виробництва та супутнім їм енергетичним потокам. За основу взяті технології основного виробництва та варіанти використання вторинних енергетичних ресурсів з книг [1 ...3]. Технологічні агрегати металургійного виробництва та їх продукція і відходи розглядаються в схемі виключно як джерела та споживачі енергетичних ресурсів – це головне спрощення. Враховано, що деякі споживачі є джерелами ВЕР для споживачів наступного рівня.

В структурну модель включені всі джерела, види ресурсів та варіанти використання з книг [1...3]. В цілому структурна модель є масштабованою, як «в ширину», так і «в глибину», додаючи нові типи джерел і споживачів, нові підрівні.

Структурна модель використовується в системно-динамічній моделі та в оптимізаційній моделі.

Статична модель. Теоретично, специфіка металургійного виробництва, особливо в плані енергоресурсів добре підходить до системно-динамічного моделювання. Але з причини складності завдання, доцільним можуть виявитися моделювання і, особливо, оптимізація, не в безперервному часі, а для декількох «статичних» періодів з усередненими характеристиками. Зі збільшенням числа таких періодів статична модель наближається до системно-динамічної.

Системно-динамічна модель служить для розрахунку в часі змін параметрів, зовнішніх умов при різних сценаріях. Відповідно – для оптимізації цільових функцій або спільно з оптимізаційною моделлю, або самостійно (пошукова оптимізація).

Відповідно до концепції системної динаміки, основними об'єктами такої моделі є «накопичувачі» і «потoki». Накопичувач – це об'єкт, що містить (або виробляє) деякий «ресурс». Величина ресурсу в накопичувачі називається «рівнем» або «об'ємом». Потік – це безперервне (або частково-безперервне) переміщення ресурсу між накопичувачами. У нашому випадку накопичувач – це агрегат металургійного виробництва, який виробляє вторинний (внутрішній) енергетичний ресурс. Наприклад, це доменна піч, яка виробляє (в нашій моделі) паливний ресурс – доменний газ.

Динаміка накопичувача (тобто агрегату, що споживає / виробляє енергетичні ресурси) в диференціальній формі може бути представлена формулою (1).

$$\frac{dV_{ij}}{dt} = \sum_j I_{ij}^{in} - \sum_j I_{ij}^{out} \quad (1)$$

В інтегральній формі:

$$V_{ij}(t) = \int_0^t (\sum_j I_{ij}^{in} - \sum_j I_{ij}^{out}) ds + V_0, \quad (2)$$

де i – № агрегату; j – № ресурсу; t – час; $V_{ij}(t)$ – об'єм ресурсу j в агрегаті i ; I_{ij} – потік ресурсу j в агрегаті i ; in – вхідний енергетичний ресурс; out – вихідний енергетичний ресурс; s – змінна інтегрування.

У моделі використовується диференціальна форма.

Ресурс ВЕР розподіляється між агрегатами наступного рівня.

Схема розподілу вихідного ресурсу Id_{ij} :

$$Id_{ij} = \delta_{ij} x_{ijk} I_{ij}^{out}, \quad (3)$$

де $\delta_{ij} = \begin{cases} 0, & \text{якщо агрегат } i \text{ не виробляє ресурс } j \\ 1, & \text{в зворотньому випадку} \end{cases}$, $0 < x_{ijk} \leq 1$ – частка

ресурсу j агрегату i , що направляється на агрегат k наступного рівня, включаючи зовнішнє середовище, $\sum_j x_{ijk} = 1$ для усіх i, k – умова розподілення.

Таким чином, агрегати металургійного виробництва є джерелами («накопичувачами» в термінах СД) внутрішніх енергоресурсів, потоки (і об'єми) яких повинні бути оптимальним чином розподілені між «накопичувачами» наступного рівня (наприклад, утилізаційними установками) відповідно до варіантом розподілу. Так встановлюється зв'язок між системно-динамічною та оптимізаційною моделями.

Оптимізаційна модель

Призначена для розрахунку окремих (скалярних) цільових функцій («критеріїв»), для пошуку значень параметрів, що доставляють екстремуми скалярним цільовим функціям та для багатокритеріальної (векторної) оптимізації.

Якщо приймати технології основного виробництва заданими, то задачу оптимального використання ВЕР можна представити як модель оптимального розподілу цих ресурсів у теплоенергетичній системі металургійного комбінату [2]. Модель формалізована як векторна (багатокритеріальна) задача нелінійного програмування. Вона може використовуватися як самостійно (на базі статичної моделі), так і спільно з системно-динамічною моделлю. Оптимізаційна частина моделі заснована на моделі з [2], але оптимізація в ній – векторна, з гнучким складом критеріїв і різними методами їх згортки в узагальнений показник (або перетворення в кілька показників – при оцінці ефективності). Далі у статті розглядається саме оптимізаційна модель. Оптимізується розподіл доменного та коксового газу між споживачами ВЕР. За основу взята модель з [2]. Основні відмінності від моделі [2]:

1. Гнучка відкрита структура, що дозволяє включати і виключати окремі технології, як основного виробництва, так і технології використання ВЕР.
2. Багатокритеріальна оптимізація на основі методів БКА, інтегрованих у СППР NooTron [6].
3. Урахування фактору часу на основі системної динаміки [4].
4. Урахування варіантів зовнішніх умов [8, 9].
5. Це – частина загальної системної моделі.

Модель містить:

1. Критерії (узагальнені скалярні цільові функції).
2. Постійні параметри.
3. Змінні параметри в «натуральному вигляді» (у них входять і параметри, що оптимізуються).
4. Параметри, що оптимізуються, у відносному вигляді.
5. Балансові співвідношення, що зв'язують параметри п.п. 1 і 2.
6. Обмеження на параметри п.4.
7. Зовнішні змінні (задаються).
8. Проміжні розрахункові змінні (використовуються в п.п. 1-6).

Цільові функції через їх громіздкість в явному вигляді не виписуються, а розраховуються алгоритмічно. Оптимізація проводиться для річного циклу за періодами. У моделі [2] два періоди – холодний (зимовий опалювальний) і теплий (літній). Наша модель дозволяє збільшувати кількість періодів. Також можна перейти до безперервного часу, тобто проводити оптимізацію безпосередньо по системно-динамічній моделі. Питання про оптимальну кількість періодів і доцільність безперервної (за часом) постановки задачі потребує окремого дослідження разом з фахівцями предметної області.

У загальному вигляді математичне формулювання оптимізаційної моделі можна представити так:

$$\begin{aligned} Cr_i(\bar{Z}) &= \sum_j w_{ij} \cdot Z_j \rightarrow \min \text{ для всіх } i, \\ Z_i &= Z_i(\bar{y}, \bar{x}, \bar{a}), \\ 0 < x_k &\leq 1 \text{ для всіх } k, \end{aligned} \quad (4)$$

де Cr_i – скалярний критерій (цільова функція) верхнього рівня; $\bar{Z}$ – вектор агрегованих параметрів, що оптимізуються; $\bar{y}$ – вектор «натуральних» параметрів, що оптимізуються; $\bar{x}$ – вектор відносних параметрів, що оптимізуються; вони пов'язані з частками x_{ijk} в системно-динамічній моделі; $\bar{a}$ – вектор заданих параметрів.

Оптимізація полягає в пошуку для кожного критерію наборів відносних параметрів, що доставляють мінімум кожному критерію. У кожного з критеріїв цей набір буде в загальному випадку свій. В якості методів оптимізації обрані пошукові методи. Перевагами пошукових методів є їх універсальність і можливість отримання багатьох субоптимальних (за кожним скалярним критерієм) рішень.

Недоліки: пошукові методи трудомісткі і не гарантують отримання точного (у математичному сенсі) глобального оптимального рішення. Але перший недолік долається зростаючої продуктивністю обчислювальної техніки. Другий недолік є неактуальним для більшості практичних задач, оскільки вихідні дані, як правило, неточні (особливо в такій галузі, як металургія).

Застосування пошукових методів найкращим чином відповідає сучасній методології дослідження та синтезу складних систем, заснованої на моделях і комп'ютерних експериментах. У поєднанні зі сценарним підходом це дозволяє отримати загальну картину проблеми необхідної деталізації, виявити не тільки оптимум, а й «вузькі місця», резерви, дослідити поведінку системи при зміні зовнішніх умов. На цьому шляху можна підвищити обґрунтованість проектних та організаційних рішень. У тому числі – по синтезу технологій.

Багатокритеріальна частина моделі включає інтегровані методи багатокритеріального аналізу і методологію оцінки ефективності BOCR

(«вигоди – можливості – витрати – ризики») [5, 9]. Ці методи реалізовані в СППР NooTron [6].

Наведемо методику оптимізації на основі загальної моделі (4).

Розрахунок цільових функцій моделі через їх громіздкість виконується алгоритмічно і складається з 6-ти етапів:

1. Задаються 25 вихідних даних (a_i).
2. Задаються 26 додаткових даних для розрахунків (g_i).
3. Задається набір з 12-ти відносних оптимізуємих параметрів (x_i , $i \in [1;12]$).

а) Обмеження: $0 \leq x_i \leq 1$.

б) Усі x_i – безрозмірні величини, виражаються через розрахункові параметри y_i .

в) Усі x_i – для одного сезону, для наступного – свій набір і знову – оптимізація.

г) Методи оптимізації: дискретизація для всіх x_i з деяким кроком (Δh_i) та повний перебір по всіх x_i (Δh_i); дискретизація та випадковий пошук: формування випадкових векторів з випадкових величин x_i , рівномірно розподілених на $[0; 1]$.

4. Розраховуються проміжні дані (y_i).

5. Для кожного набору $\bar{X}$ розраховуються значення цільових функцій $Cr_1(\bar{X})$, $Cr_2(\bar{X})$ [2]:

а) енергетичний критерій – приведена витрата привізного умовного палива, споживаного комбінатом (природний газ та електроенергія з регіональної електромережі):

$$Cr_1(\bar{X}) = z_1 + b_{11} \cdot z_2 \rightarrow \min; \quad (5)$$

б) економічний критерій – сума витрат на приведену витрату умовного палива:

$$Cr_2(\bar{X}) = b_{21} \cdot z_1 + b_{22} \cdot z_2 \rightarrow \min. \quad (6)$$

Тут z_1 и z_2 – річна витрата природного газу та електроенергії відповідно (7), (8).

$$z_1 = \sum_{i=1}^N y_{86}^i \quad (7)$$

$$z_2 = \sum_{i=1}^N y_{87}^i \quad (8)$$

b_{11} – середня питома витрата умовного палива на відпуск електроенергії (з урахуванням втрат ЛЕП) в даній ОЕС, кг/(кВт·год.); b_{21} – ціна на природний газ (грн./т); b_{22} – ціна на електроенергію (грн./(МВт·год.)).

Екологічний критерій (мінімум зваженої суми викидів) [3] нижче не оптимізується, бо у статичній моделі обсяг втрат ВЕР є заданим.

6. Для подальшого багатокритеріального аналізу знаходяться субоптимальні значення (наприклад, по 10 кращих значень для кожної скалярної цільової функції) і відповідні їм набори $\overline{X}^{opt} = \{x_1, x_2, \dots, x_{12}\}^{opt}$.

7. Розрахунковими даними заповнюється матриця корисностей. На її основі із застосуванням інтегрованого методу MAI + MMP (метод аналізу ієрархій та метод матриці рішень) [8] проводиться багатокритеріальний аналіз субоптимальних варіантів. На цій основі приймається рішення про кращий варіант за сукупністю розглянутих критеріїв. Альтернативами в матриці корисностей служать субоптимальні варіанти, їх число можна варіювати. Варіанти зовнішніх умов задаються як комбінації з трьох можливих рівнів (низький – середній – високий) для двох критеріїв – енергетичного та економічного.

Використання методу матриці рішень дозволяє провести порівняльний аналіз субоптимальних варіантів, отриманих за оптимізаційної моделі, враховуючи можливі варіанти зовнішніх умов, такі, наприклад, як зміна цін на споживані енергетичні ресурси (у нашому випадку – на газ та електроенергію). На цій основі вибираються варіанти, кращі як по кожному критерію, так і за сукупністю критеріїв, тобто проводиться векторна оптимізація з використанням, наприклад, методу аналізу ієрархій (MAI) або методу аналізу мереж (МAM). Застосовується інтегрований метод «метод аналізу ієрархій + метод матриці рішень» (MAI + MMP) дозволяє провести аналіз із одночасним застосуванням декількох правил вибору кращої альтернативи (так званих «критеріїв MMP») [8].

Для проведення багатокритеріального аналізу та векторної оптимізації застосовується система підтримки прийняття рішень NooTron. СППР розроблена на кафедрі інформаційних технологій і систем НМетАУ, її основу складають методи багатокритеріального аналізу. СППР у вигляді веб-додатку знаходиться у вільному доступі за адресою: <http://nootron.net.ua>. У ній є «Довідка» з докладним описом методів і прикладами розв'язання задач [6].

СППР NooTron, побудована на базі сучасних інформаційних технологій, дозволяє забезпечити таку властивість системної моделі, як інтерактивність. СППР крім іншого дозволяє підвищити оперативність виконання багатокритеріального аналізу.

Багатокритеріальна оптимізація розподілення горючих ВЕР

На основі запропонованої методики проведено багатокритеріальну оптимізацію розподілення горючих ВЕР металургійного заводу з наступним базовими вхідними показниками (табл. 1), показники 1-3 узяті з [2], ціни на енергоносії узяті за 2014 рік.

Таблиця 1

Вхідні показники для оптимізації розподілення горючих ВЕР

№	Назва показника	Значення
1	Ресурси доменного газу (т у.п./рік)	2556000
2	Ресурси коксового газу (т у.п./рік)	1541000
3	Продуктивність прокатних станів (т сталі/рік)	8000000
4	Ціна на природний газ (грн./т)	3539,35
5	Ціна на електроенергію (грн./(МВт·год.)).	1162,9

Багатокритеріальна оптимізація складалася з двох етапів: 1) пошук наборів $\bar{X}$ (12-компонентних векторів параметрів, що оптимізуються), які відповідають кращим значенням цільових функцій Cr_1 та Cr_2 ; 2) багатокритеріальний аналіз кращих наборів $\bar{X}$ з урахуванням варіантів зовнішніх умов.

Для пошуку кращих значень цільових функцій Cr_1 та Cr_2 на основі загальної моделі (4) розроблена програма оптимізації розподілення горючих ВЕР, метод оптимізації – метод повного перебору (brute force) з певним кроком дискретизації по x_i , який задається.

Під час виконання оптимізації з кроком 0,25 по кожному x_i перебрано 244140625 наборів $\bar{X}$. У результаті знайдено кращі значення цільових функцій $Cr_1 = 3214,9$ (тис. т у.п.) та $Cr_2 = 1068,29$ (млн. грн.), а також відповідний їм набір $\bar{X}$. Він виявився оптимальним для обох критеріїв, що можна пояснити їх лінійною залежністю від проміжних критеріїв z_1 та z_2 (7, 8).

Для аналізу отриманого результату розраховано Δ_1 (9) та Δ_2 (10) серед 10, 100 та 1000 кращих значень кожної цільової функції (рис. 3, 4).

$$\Delta_1^j = Cr_i^j - Cr_i^1, \quad (9)$$

де Δ_1^j – відстань між j-тим та першим кращими значеннями цільової функції Cr_i ; Cr_i^j – j-те краще значення цільової функції Cr_i ; Cr_i^1 – 1-ше краще значення цільової функції Cr_i .

$$\Delta_2^j = \overline{Cr_i^{[1:j]}} - Cr_i^1, \quad (10)$$

де Δ_2^j – відстань між середнім серед [1; j] та першим кращими значеннями цільової функції Cr_i ; $\overline{Cr_i^{[1:j]}}$ – середнє значення цільової функції Cr_i серед [1; j]; Cr_i^1 – 1-ше краще значення цільової функції Cr_i .

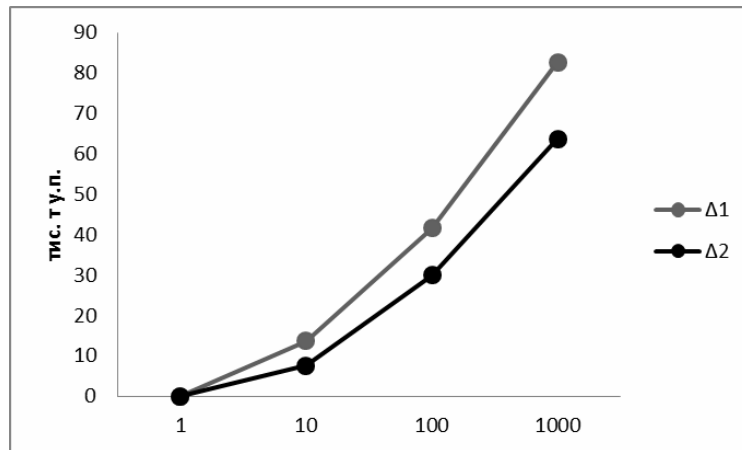


Рисунок 3. – Графік відмінності кращого значення Cr_1

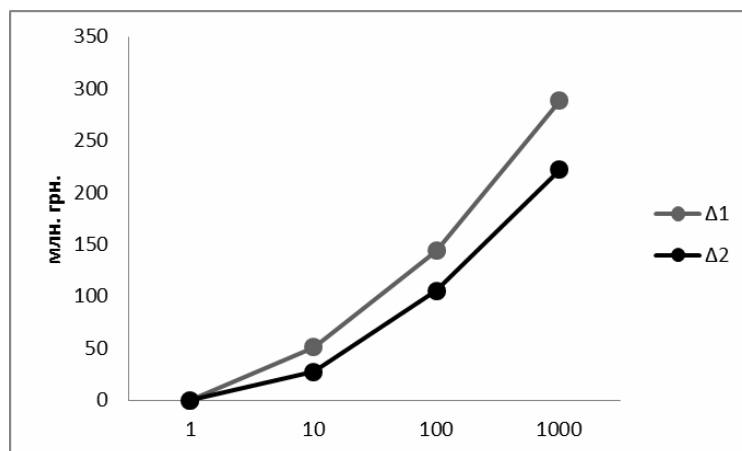


Рисунок 4. – Графік відмінності кращого значення Cr_2

Значення кожної цільової функції залежить не тільки від $\bar{X}$, але й від таких параметрів, як b_{11} , b_{21} , b_{22} (5),(6), що можуть змінюватись. Тому доцільно провести багатокритеріальний аналіз кращих наборів $\bar{X}$ (табл. 2) з урахуванням варіантів зовнішніх умов.

Для цього запропоноване наступне розширення інтегрованого методу МАІ+ММР: 1) для кожного критерію розраховується власна матриця корисностей; 2) за обраними правилами ММР розраховуються узагальнені корисності альтернатив (наборів); 3) за МАІ на основі отриманих узагальнених корисностей синтезуються пріоритети альтернатив щодо кожного критерію; 4) з урахуванням пріоритетів критеріїв на базі МАІ розраховуються глобальні пріоритети альтернатив (наборів) за сукупністю критеріїв.

Таблиця 2

Показники наборів $\bar{X}$, відібраних до аналізу

№ набору $\bar{X}$	z_1 (т у.т.)	z_2 (МВтч)	Cr_1 (тис. т у.п.)	Cr_2 (млн. грн.)
39687504	5341,94	9170167,97	3214,90	10682,90
40087504	14172,51	9161381,88	3220,66	10703,93
87890629	5279,21	9200527,05	3225,46	10717,98
39062503	33425,05	9128782,69	3228,50	10734,16
88996879	10454,04	9195378,28	3228,84	10730,31
40006253	34829,33	9127385,48	3229,41	10737,51
136718754	5216,49	9230886,12	3236,03	10753,06

Для розрахунку матриць корисностей альтернатив (наборів $\bar{X}$ з табл. 2) прийнято, що значення показника b_{11} може збільшитися / зменшитися на 15%, для показників b_{21} , b_{22} – збільшитися / зменшитися на 20%. Відносно енергетичного критерію (Cr_1 , (5)) отримана матриця корисностей для 3-х варіантів зовнішніх умов: $V_1 = \{b_{11}, b_{11} + 15\%, b_{11} - 15\%\}$. Для економічного критерію (Cr_2 , (6)) отримана матриця корисностей для 9-ти варіантів зовнішніх умов: $V_2 = \{b_{21}, b_{22}\}, \{b_{21}, b_{22} + 20\%\}, \{b_{21}, b_{22} - 20\%\}, \{b_{21} + 20\%, b_{22}\}, \{b_{21} + 20\%, b_{22} + 20\%\}, \{b_{21} + 20\%, b_{22} - 20\%\}, \{b_{21} - 20\%, b_{22}\}, \{b_{21} - 20\%, b_{22} + 20\%\}, \{b_{21} - 20\%, b_{22} - 20\%\}$.

Щодо кожного критерію розраховані узагальнені корисності альтернатив за правилами Гурвіца ($c = 0,5$) (нормовані на максимум) та Севіджа (нормовані на мінімум), відносні показники корисностей наведені на рис. 5, 6.

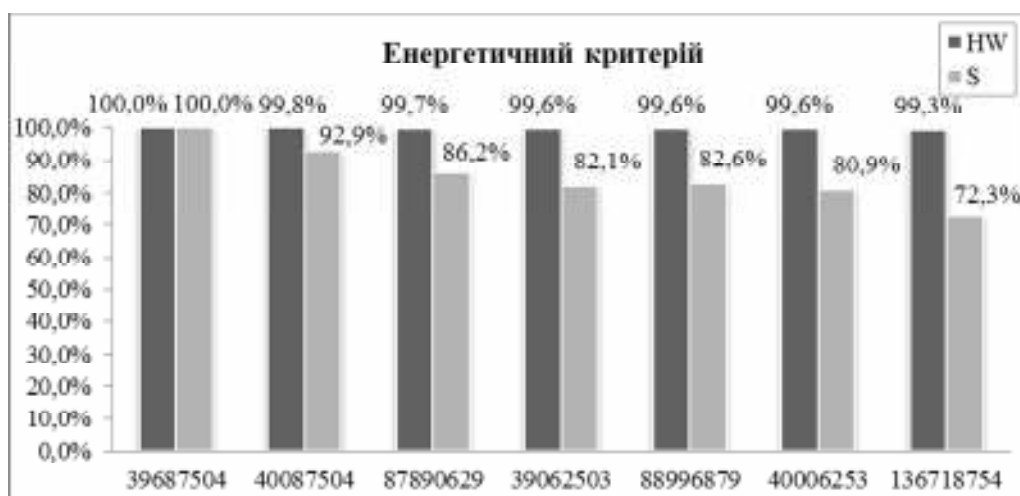


Рисунок 5. – Діаграма відносних корисностей наборів $\bar{X}$ за енергетичним критерієм

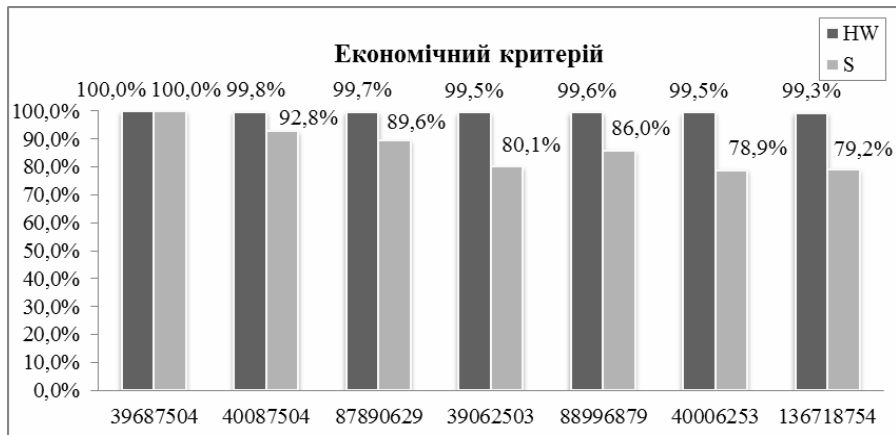


Рисунок 6. – Діаграма відносних корисностей наборів $\bar{X}$ за економічним критерієм

На наступному етапі отримані пріоритети альтернатив за кожним критерієм (рис. 7).

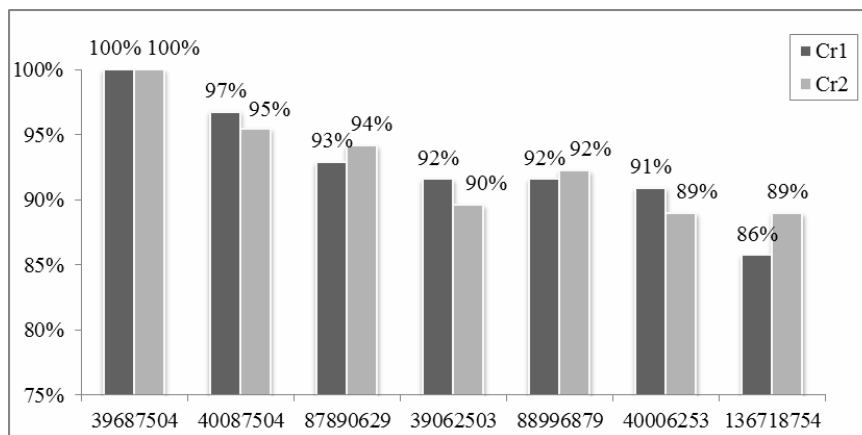


Рисунок 7. – Діаграма відносних пріоритетів наборів $\bar{X}$ за критеріями Cr_1 та Cr_2

На заключному етапі розраховані глобальні пріоритети наборів за сукупністю критеріїв (рис. 8).

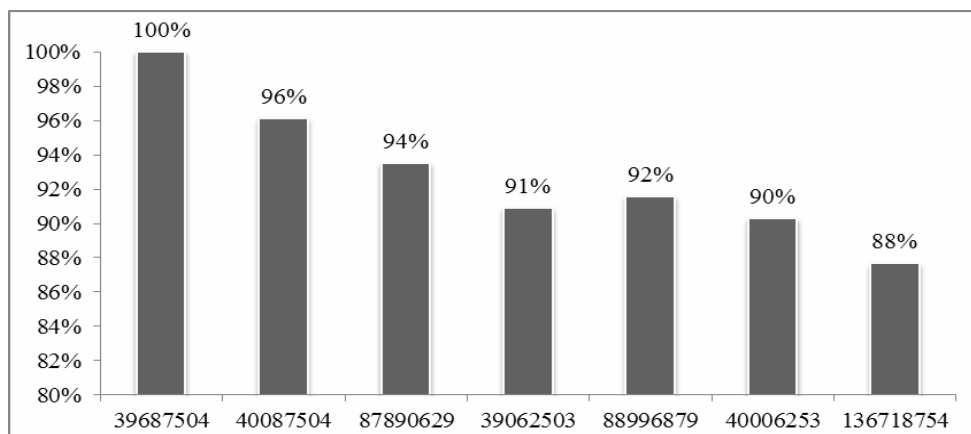


Рисунок 8. – Діаграма відносних глобальних пріоритетів наборів $\bar{X}$

Проведений багатокритеріальний аналіз підтвердив, що отриманий набір $\bar{X}$ (39687504) є кращим за сукупністю критеріїв також і з урахуванням можливих змін зовнішніх умов. Отже, запропонована методика дозволяє отримувати загальне рішення багатокритеріальної задачі не тільки за декількома правилами ММР, як в інтегрованому методі МАІ+ММР, але й узагальнює рішення для потрібної кількості матриць корисностей.

Висновки

Проблема раціонального використання ВЕР металургії залишається актуальною в таких аспектах: виробничому, енергетичному, економічному, екологічному. Математичне моделювання процесів розподілу та використання ВЕР дозволяє оптимізувати ці процеси, підвищити обґрунтованість проектних та організаційних рішень. Таке моделювання, враховуючи складність системи, повинне ґрунтуватися на методах системного аналізу та сучасних інформаційних технологіях.

Запропонована загальна концепція системної моделі, заснована на об'єднанні методів багатокритеріального аналізу та пошукової оптимізації у вирішенні проблеми раціонального використання вторинних енергетичних ресурсів (ВЕР) металургійного виробництва.

Відповідно до принципів системного моделювання, побудована схема системи взаємопов'язаних математичних моделей із застосуванням різного математичного апарату і сучасних інформаційних технологій. Для проведення багатокритеріального порівняльного аналізу забезпечено інтерактивну взаємодію на основі використання системи підтримки прийняття рішень NooTron (<http://nootron.net.ua>).

Розроблено новий комбінаторний підхід до обліку можливих змін зовнішніх умов: аналіз великого числа субоптимальних варіантів для можливих поєднань варіантів зовнішніх умов та декількох матриць корисностей. Вирішена модельна задача оптимального розподілу зовнішніх і внутрішніх (доменний та коксовий газ) енергетичних ресурсів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Розенгарт Ю.И., Якобсон Б.И., Мурадова З.А. Вторичные энергетические ресурсы чёрной металлургии и их использование. К.: Вища шк. 1988. – 304 с.
2. Сазанов Б.В., Ситас В.И. Теплоэнергетические системы промышленных предприятий. М.: Энергоатомиздат, 1990. – 304 с.
3. Ярошенко Ю.Г. Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии черной металлургии: учеб. пособие / Ю.Г. Ярошенко, Я.М. Гордон, И.Ю. Ходоровская. Под ред. Ю.Г. Ярошенко. – Екатеринбург: ООО «УИПЦ» 2012. – 670с.
4. Карпов Ю.Г. Имитационное моделирование систем. Введение в моделирование с AnyLogic 5. – СПб.: БХВ-Петербург. – 2006. – 400 с.
5. Саати Т.Л. Принятие решений при зависимостях и обратных связях: Аналитические сети. – М.: Издательство ЛКИ, 2008. – 360 с.
6. Система поддержки принятия решений NooTron [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://nootron.net.ua>

7. Микони С.В., Ходаковский В.А. Основы системного анализа. – СПб.: Изд-во ПГУПС, 2011. – 143 с.
8. Михалёв А.И., Кузнецов В.И., Ковалик Н.Н., Теплякова Г.Л. Интеграция методов багатокритеріального анализа и их применение в системе поддержки принятия решений // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 4 (75). – Дніпропетровськ, 2011.
9. Михалев А.И., Кузнецов В.И., Теплякова Г.Л. Оценка эффективности проектов объединенным методом багатокритеріального анализа // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 3(80). – Днепропетровск, 2012. – С.113-121.
10. Евтушенко Г.Л., Кузнецов В.И., Михалёв А.И. Системная модель использования внутренних энергетических ресурсов металлургического предприятия // Інтелектуальні системи прийняття рішень і проблеми обчислювального інтелекту: Матеріали міжнародної наукової конференції. – Херсон: ХНТУ, 2014. – С. 70-71.
11. Evtushenko G., Mikhalyov A., Kuznetsov V. The Strategies of System Model Synthesis: General Approach // Computer Science & Information Technologies (CSIT'2014), November 2014, Lviv, Ukraine. – P. 87-88

**ДИНАМИКА СТЕРЖНЯ ОПРАВКИ ПРОШИВНОГО СТАНА
С УЧЕТОМ ПЕРЕМЕННОСТИ ВО ВРЕМЕНИ
МАССЫ МЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ**

Приведено решение задачи виброактивности для уточненной динамической модели системы «гильза (труба) – оправка – стержень» прошивного стана трубопрокатного агрегата. Составлены дифференциальные уравнения продольных и поперечных колебаний оправки со стержнем прошивного стана, с учетом переменности во времени массы механической системы. Особенности поведения оправки в очаге деформации и виброактивность стержневой системы механизма удержания оправки прошивного стана установлены с учетом переменности присоединенной массы прокатываемой трубы. Проведен комплексный анализ динамики механизмов выходной стороны стана коэффициентом динамичности системы. Установлены динамические особенности функционирования систем механизма удержания оправки с учетом переменности массы прокатываемой трубы.

Ключевые слова: прошивной стан, труба, динамика, вибрация, оправка, стержень, дифференциальное уравнение, гильза, переменная масса, жесткость, колебания, центрователь, интегралы Френеля, задача Лагранжа, разностенность труб

The solution of a problem of vibroactivity for the specified dynamic model of system "a sleeve (pipe) – a mandrel – a core" a parsing camp is provided. The differential equations of longitudinal and cross fluctuations of a mandrel and core of a parsing camp, taking into account variability in time of mass of mechanical system are worked out. Features of behavior of a mandrel in the center of deformation and vibroactivity of rod system of the mechanism of deduction of a mandrel of a parsing camp are established taking into account variability of the attached mass of a rolled pipe. The complex analysis of dynamics of mechanisms of the output party in coefficient of dynamism of system is carried out. Dynamic features of functioning of the mechanism of deduction of a mandrel taking into account variability of mass of a rolled pipe are established.

Keywords: parsing camp, pipe, dynamics, vibration, mandrel, core, differential equation, sleeve, variable weight, rigidity, fluctuations, Frennel's integrals, Lagrange's task.

Для реализации устойчивых технологических операций прошивки сплошной трубной заготовки на выходной стороне современных прошивных станов трубопрокатных агрегатов (ТПА) используются многочисленные удерживающие, направляющие, центрирующие и упорно-регулирующие механизмы [1].

Для формирования стабильной геометрии прокатываемых труб практическое значение имеет стабилизация виброактивности вращающегося стержня механизма удержания оправки стана. Вращающийся длинный стержень оправки воспринимает значительные статические и изменяющиеся во времени динамические нагрузки со стороны прошиваемой трубной заготовки. В силу того, что стержень оправки имеет значительную гибкость и большую массу, то вызывает в

рассматриваемой механической системе значительные по величине и изменяющиеся во времени динамические нагрузки, которые обуславливают его поперечный изгиб по соответствующим гармоническим формам и продольные колебания оправки вдоль оси прошивки. При продольных колебаниях стержень совместно с оправкой перемещается в очаге деформации вдоль оси прокатки. Следовательно, центрирующий пояс опрaвки уходит от пережима рабочих валков вызывает, преимущественно, ненормированную разностенность гильзы (трубы) [2].

Пути интенсификации технологического процесса и вопросы повышения качества прокатываемых труб диктуют необходимые условия совершенствования конструкций центрователей стержня оправки, установленных по всей выходной стороне прошивных станов [3].

Для формирования научно-обоснованных предложений по совершенствованию конструкции выходной стороны прошивных станов и технологии производства труб на станах необходимо более глубоко изучить влияние различных параметров и особенностей прокатки труб на поведение механической системы и качество готовой продукции.

Решение поставленной задачи обуславливает уточнение расчетной схемы и дальнейшее развитие математической модели исследуемой стержневой системы прошивного стана ТПА, адекватно отражающей реальные процессы, происходящие в исходной механической системе (рис. 1).

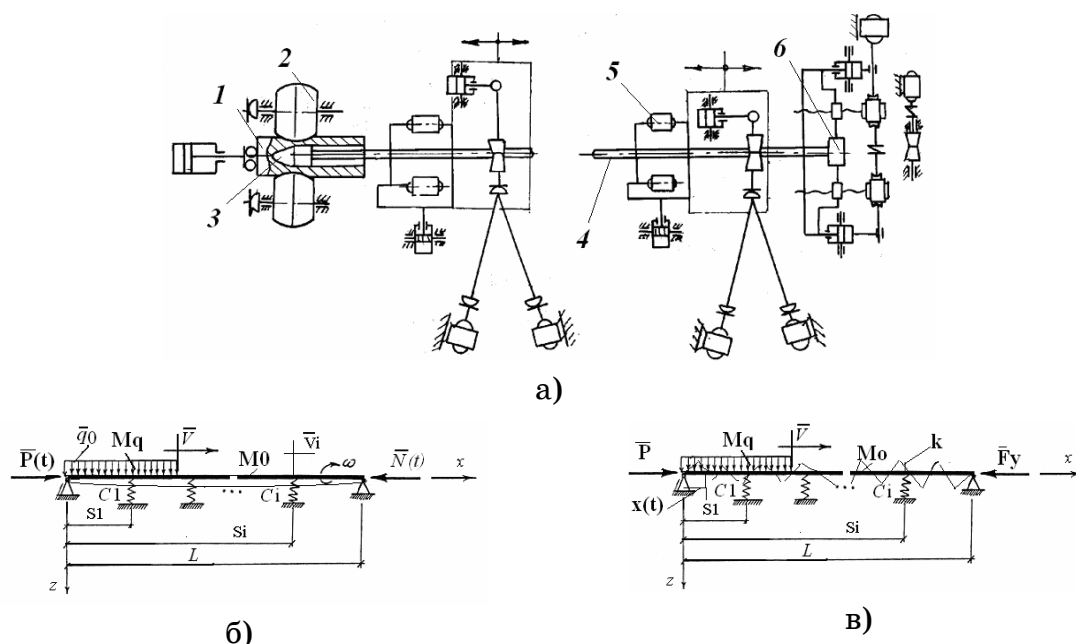


Рисунок 1 – Схема выходной стороны прошивного стана а), расчетная схема поперечных б) и продольных в) колебаний стержневой системы механизма удержания оправки трубопрокатного агрегата

В настоящей работе в качестве объекта исследования рассмотрена развитая динамическая и математическая модели стержневой системы механизма удержания оправки прошивного стана ТПА, отличающаяся от

известных [1 – 3] переменными во времени инертными характеристиками системы и параметрами центрователей выходной стороны стана.

Изменение интенсивности воздействия со стороны очага деформации, массы трубной заготовки и параметров центрователей стержня, рядно установленных вдоль оси прошивки, значительно усложняет описание динамических процессов в системе [1, 2].

Исследование развитой динамической модели «стержень - трубная заготовка» позволит проанализировать динамическое состояние стержневой системы с оправкой в течение всего процесса прошивки трубной заготовки и на основании вышеизложенного, решить задачу по модернизации оборудования выходной стороны прошивного стана.

В качестве расчетной схемы стержневой системы стана винтовой прокатки труб примем стержень постоянного сечения с шарнирными опорами на концах и упругими опорами (центрователями) между ними (рис. 1б). Стержень, вращающийся с угловой скоростью ω вокруг оси прокатки x , подвергается воздействию осевого составляющего усилия прошивки $\vec{P}_0$ со стороны очага деформации. При этом по стержню с условно постоянной скоростью прошивки $\vec{V}$ (равномерно) перемещается и совместно со стержнем вращается распределенная нагрузка прокатываемой гильзы интенсивности $\vec{q}(x, t)$ и погонной массы M_q .

Для построения уточненной математической модели данной системы и последующего анализа динамического состояния стержня с оправкой в процессе прошивки трубной заготовки воспользуемся соответствующими дифференциальными уравнениями продольного движения оправки в очаге деформации и поперечных колебаний вращающегося однородного стержня на упругом основании опор центрователей [3, 4]

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \left[M(t) \frac{dx(t)}{dt} \right] = \sum_{k=1}^n F_{kx}; \\ M_0 \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2} + \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left[EI_y \frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2} + f \left(\frac{\partial^3 u_z}{\partial x^2 \partial t} - \omega \frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2} \right) \right] + \\ + k_0 \frac{\partial u_z}{\partial t} + cu_z = M_0 \omega^2 [e_1 \sin(\omega t) + e_2 \cos(\omega t)], \end{cases} \quad (1)$$

где $x(t)$ – продольное перемещение оправки в очаге деформации по оси прокатки; $M(t)$ – присоединенная переменная во времени масса системы; EI_y , M_0 – соответственно изгибная жесткость стержня и его погонная масса; u_z – перемещения стержня по оси z ; c , k_0 – коэффициенты упругого основания опор, зависящие от перемещения и скорости соответственно; f – коэффициент, учитывающий вязкое трение в системе в процессе колебания стержня оправки; $e_1(x)$, $e_2(x)$ – эксцентриситеты, характеризующие неуравновешенность масс стержня оправки вокруг оси прошивки; ω – угловая скорость вращения стержня оправки вокруг оси прокатки.

Силу упругости стержня оправки в продольном направлении оси прокатки принимаем по линейному закону Гука

$$F(t) = kx(t). \quad (2)$$

Здесь k – жесткость стержня оправки в продольном направлении.

Заменим упругое основание стержня оправки конечным числом i – податливых опор центрователей $\sum_{i=1}^n c_i u_z \delta(x_i - s_i)$. В предположении того, что внутреннее трение в системе по сравнению с технологическими и динамическими нагрузками незначительно, неуравновешенность масс механической системы лежит в одной плоскости $e_1(x) = e_2(x) = e(x)$, согласно [1, 4], приходим к упрощенному дифференциальному уравнению

$$\begin{cases} M(t) \frac{d^2 x(t)}{dt^2} + \frac{dM(t)}{dt} \frac{dx(t)}{dt} + kx(t) = P_0; \\ M_0 \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + EI_y \frac{\partial^4 u}{\partial x^4} + \sum_{i=1}^n c_i u \delta(x_i - s_i) = M_0 \omega^2 e(x) \sin(\omega t). \end{cases}, \quad (3)$$

где $\delta(x - x_{oi})$ – дельта-функция Дирака; s_i – проектные положения опорных узлов вдоль оси стержня оправки; V_i – скорость движения соответствующих центрователей стержня оправки вдоль оси прокатки трубы.

Принимая во внимание, что дельта функция Дирака обладает характерным фильтрующим свойством, согласно [3, 9], с учетом продольной сжимающей силы (усилия прошивки) P_0 и надвигающейся нагрузки гильзы интенсивности $\vec{q}(x, t)$ и опор (центрователей) систему дифференциальных уравнений (3) преобразуем соответствующим образом.

Базируясь на фундаментальных исследованиях вопросов динамики тела переменной массы, исходя из постановки задачи И. В. Мещерского [4, 5], учитываем важную реактивную слагаемую $\frac{dM(t)}{dt} \frac{dx(t)}{dt}$ инерционной нагрузки в уравнении (3). Тогда система дифференциальных уравнений продольных и поперечных колебаний стержня оправки (3) с учетом изложенного [3, 5, 7] приобретает вид

$$\begin{cases} M(t) \frac{d^2 x(t)}{dt^2} + \frac{dM(t)}{dt} \frac{dx(t)}{dt} + kx(t) = P_0; \\ \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2} + EI_y \frac{\partial^4 u_z}{\partial x^4} + P_0 \frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2} + \sum_{i=1}^n c_i u_z \delta(x_i - s_i) - \\ - q(x, t) = M_0 \omega^2 e(x) \sin(\omega t), \end{cases} \quad (4)$$

где $q(x, t)$ – интенсивность воздействия прошиваемой трубной заготовки на стержень оправки, обладающая определенной инертностью, которая может быть найдена согласно [3] в виде

$$q(x, t) = q_0 - M_q \left(\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + V^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + 2V \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t} \right) \Big|_{x=Vt}. \quad (5)$$

Здесь q_0 , M_q – соответственно интенсивность и погонная масса прокатываемой гильзы; V – скорость перемещения (прошивки) гильзы по стержню оправки; $\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$ – относительное ускорение гильзы; $V^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$ – переносное ускорение гильзы; $2V \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t}$ – кориолисово ускорение прокатываемой гильзы.

С учетом характерного изгиба гибкого стержня в процессе прошивки гильзы в первом приближении примем уравнение эксцентриситета его оси по отношению к оси прошивки в синусоидальной форме.

Тогда для выполнения процедуры Бубнова – Галеркина, согласно [3, 7], оператор дифференциального уравнения (4) с учетом вышеизложенного представим в виде

$$L(u) = M_0 \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2} + EI_y \frac{\partial^4 u_z}{\partial x^4} + P_0 \frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2} + \sum_{i=1}^n c_i u_z \delta(x_i - s_i) - q(x, t) - M_0 \omega^2 f(t) \sin \frac{\pi x}{\ell} \sin(\omega t). \quad (6)$$

Подставляя выражение (5) и (6) в (7), с учетом ортогональности форм собственных колебаний механической системы, после интегрирования и преобразований окончательно получаем дифференциальное уравнение движения изображающей точки на оси стержня оправки (середина пролета стержня) по первой форме колебаний в виде

$$A(t) \frac{d^2 f(t)}{dt^2} + B(t) \frac{df(t)}{dt} + C(t)f(t) = \frac{2q_0}{M_0 \pi} \left(1 - \cos \left(\pi \frac{Vt}{\ell} \right) \right); \quad (7)$$

где

$$\begin{aligned} A(t) &= 1 + \frac{M_q}{2\pi M_0} \left(2\pi \frac{Vt}{\ell} - \sin \left(2\pi \frac{Vt}{\ell} \right) \right); \\ B(t) &= \frac{VM_q}{M_0 \ell} \left(1 - \cos \left(2\pi \frac{Vt}{\ell} \right) \right); \\ C(t) &= \left[\frac{EI}{M_0} \left(\frac{\pi}{\ell} \right)^4 + \frac{2}{M_0 \ell} \sum_{i=1}^n c_i \sin^2 \left(\frac{\pi s_i}{\ell} \right) - \frac{P_0}{M_0} \left(\frac{\pi}{\ell} \right)^2 - \right. \\ &\quad \left. - \frac{M_q}{M_0} \frac{V^2}{\ell^2} \pi \left(2\pi \frac{Vt}{\ell} - \sin \left(2\pi \frac{Vt}{\ell} \right) \right) - \omega^2 \sin(\omega t) \right], \end{aligned}$$

соответствующие коэффициенты дифференциального уравнения (7).

Поперечные колебания изображающей точки моделируемой стержневой системы с учетом режимов прокатки труб на прошивном стане будет представлена численным решением дифференциального уравнения (7) по методу Рунге-Куты.

Переходим к решению второй части задачи исследования динамики стержневой системы механизма удержания оправки прошивного стана ТПА с учетом переменности массы всей системы (рис.2 б). Отметим, что переменность во времени массы прокатываемой гильзы вызывает изменение инертности всего механизма удержания оправки, что во многом определяет характер развития виброактивности механической системы.

Базируясь на результатах исследований [1 – 3], закон изменения массы системы с учетом переменности во времени массы подвижной трубы принимаем в виде

$$M(t) = M_0 + M_q \frac{x}{l} \Big|_{x=vt} = M_0(1 + \gamma t), \quad (8)$$

где $\gamma = \frac{M_q}{M_0} \frac{v}{l}$ – коэффициент скорости изменения массы прокатываемой трубы ($\lambda \geq 0$ масса механической системы всегда увеличивается); M_0 – начальная масса системы.

Следовательно, для анализа соответствующей части уравнения (4) с учетом (8) формируем задачу Коши и с учетом определенных начальных условий [1 – 7]

$$\begin{cases} M_0(1 + \gamma t) \frac{d^2 x(t)}{dt^2} + M_0 \gamma \frac{dx(t)}{dt} + cx(t) = P_0 H(t); \\ x(0) = x_0; \quad \dot{x}(0) = \dot{x}_0. \end{cases} \quad (9).$$

Переходим к нахождению коэффициента динамичности механической системы при действии реактивной составляющей. Учитывая действие реактивной силы, решаем дифференциальное уравнение (9).

Разделив части уравнения на M_0 запишем:

$$(1 + \gamma t) \frac{d^2 x}{dt^2} + \gamma \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = \frac{P_0}{M_0} H(t), \quad (10)$$

где $H(t)$ – импульсная функция Хевисайда; $\omega_0 = \sqrt{k/M_0}$ – частота свободных продольных колебаний оправки со стержнем.

Фундаментальными решениями уравнения (10) ($P_0 = 0$) в приближении ВБК – метода [8] теперь является:

$$x_1(t) = \eta^{-1/2} \cos \eta; \quad x_2(t) = \eta^{-1/2} \sin \eta, \quad (11)$$

где $\eta = \eta(t) = \eta_0 \sqrt{1 + \gamma t}$; $\eta_0 = \frac{2\omega_0}{\gamma}$.

Для уравнения (11) $\Delta(t) = \frac{\gamma \eta_0^2}{2\eta^2}$ и выполняются остальные равенства

$$\Delta(t) = \frac{1}{2} \gamma \eta_0^2 = const; \quad (1 + \gamma t) = \frac{\eta^2}{\eta_0^2}; \quad dt = \frac{2\eta}{\gamma \eta_0^2} d\eta.$$

При этом, задача Коши, согласно Лагранжу, имеет решение в квадратурах:

$$x(t) = c_1(t)x_1(t) + c_2(t)x_2(t), \quad (12)$$

где

$$\begin{aligned} c_1(t) &= -\frac{P_0}{M_0} \int_0^t \frac{x_2(t) dt}{(1 + \gamma t) \Delta(t)}; \\ c_2(t) &= \frac{P_0}{M_0} \int_0^t \frac{x_1(t) dt}{(1 + \gamma t) \Delta(t)}; \\ \Delta(t) &= x_1(t) \frac{dx_2}{dt} - x_2(t) \frac{dx_1}{dt}. \end{aligned} \quad (13)$$

Здесь $x_1(t)$, $x_2(t)$ – соответствующие фундаментальные решения однородного дифференциального уравнения (10).

Используя (12) и (13), вычисление коэффициента динамичности сводим к формуле:

$$K_\partial(\eta) = \eta^{-1/2} [b_1(\eta) \cos \eta + b_2(\eta) \sin \eta], \quad (14)$$

в которой

$$b_1(\eta) = -\int_{\eta_0}^{\eta} \sqrt{\eta} \sin \eta d\eta; \quad b_2(\eta) = \int_{\eta_0}^{\eta} \sqrt{\eta} \cos \eta d\eta.$$

Интегрированием по частям далее $b_1(\eta)$ и $b_2(\eta)$ выражаем через интегралы Френеля:

$$b_1(\eta) = \sqrt{\eta} \cos \eta - \sqrt{\eta_0} \cos \eta_0 + \frac{\sqrt{\pi}}{\sqrt{2}} [C(\eta_0) - C(\eta)]; \quad (15)$$

$$b_2(\eta) = \sqrt{\eta} \sin \eta - \sqrt{\eta_0} \sin \eta_0 + \frac{\sqrt{\pi}}{\sqrt{2}} [S(\eta_0) - S(\eta)],$$

где $S(\eta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\eta} \frac{\sin \eta}{\sqrt{\eta}} d\eta$; $C(\eta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\eta} \frac{\cos \eta}{\sqrt{\eta}} d\eta$ – интегралы Френеля [10, 11].

Подстановкой (15) в (14) находим:

$$\begin{aligned} K_\partial(\eta) &= 1 - \frac{\sqrt{\eta_0}}{\sqrt{\eta}} \cos(\eta - \eta_0) + \frac{\sqrt{\pi}}{\sqrt{2\eta}} \\ &\quad \{ [C(\eta_0) - C(\eta)] \cos \eta + [S(\eta_0) - S(\eta)] \sin \eta \} \end{aligned} \quad (16)$$

При $\eta \gg 1$ и $\eta_0 \gg 1$, учитывая асимптотику (10), вместо (16), получаем более простую приближённую формулу

$$K_\partial(\eta) = 1 - \frac{\sqrt{\eta_0}}{\sqrt{\eta}} \cos(\eta - \eta_0) - \frac{1}{2\sqrt{\eta\eta_0}} \sin(\eta - \eta_0). \quad (18)$$

Исследуя (18) на экстремум, находим, что

$$K_{\theta}^{\max} = 1 + \sqrt{\frac{\eta_0}{\eta^*}} \sqrt{1 + \frac{1}{4\eta_0^2}}. \quad (19)$$

Здесь

$$\eta^* = \begin{cases} n_0 + \varphi + (2n-1)\pi & \gamma > 0 \\ n_0 + \varphi - (2n-1)\pi & \text{при } \gamma < 0, \varphi = \arctg \frac{1}{2\eta_0}, n = 1, 2, 3, \dots \end{cases}$$

При возрастающей массе механической системы имеем $\eta^* > \eta_0$.

Поэтому, когда $\eta^* > \eta_0 + \frac{1}{4\eta_0}$, согласно (19), первый, соответствующий

$n = 1$, $K_{\theta}^{\max} < 2$, а последующие максимумы меньше первого.

Таким образом, при действии реактивной силы меняется динамическое поведение системы «гильза (труба) – оправка – стержень». Неравенства для оценки максимума коэффициента динамичности становятся противоположными тем, что были ранее получены без учёта реактивной силы [3, 7].

Далее переходим к численному анализу и синтезу результатов задачи виброактивности стержня оправки прошивного стана ТПА. Выполним анализ уточненной математической модели задачи виброактивности оправки со стержнем для прошивного стана ТПА 140.

Дифференциальное уравнение (7) с правой частью составлено и представлено в виде известных параметрических уравнений, что с достаточно высокой степенью точности описывает поперечные колебания стержня оправки прошивного стана. Численное решение дифференциального уравнения (7) по методу Рунге – Кутты позволяет оценить поперечные перемещения изображающей точки (середины) стержня оправки для наиболее распространенных форм колебаний системы.

Кривые, приведенные на рисунке 3, описывают данные динамические особенности процесса, происходящие в стержне механизма удержания оправки прошивного стана ТПА 140 при прокатке труб диаметром 114x12 из стали сталь 20.

Расчетные кривые, приведенные на рис. 3 и рис. 4 указывают на крайне неудовлетворительные условия функционирования стержня с оправкой при прошивке трубной заготовки на прошивном стане ТПА 140.

Исследуем влияние реактивной силы на коэффициент динамичности механической системы K_{θ} . Примем следующие исходные данные для прошивного стана ТПА 140: $l = 12$ м; $v = 2$ м/с; $M_0 = m_0 l$; $M_q = m_q l$; $m_0 = 120$ кг/м; $m_q = 80$ кг/м; $c = 18 \cdot 10^6$ Н/м; $t \in [0; 6]$ с.

В таблице 1 представлены значения K_{θ} , полученные с помощью численного интегрирования уравнения (10) (первая строка), приближённой

формулы (16) (числители) и приближённой формулы (18) (знаменатели), при возрастании массы системы.

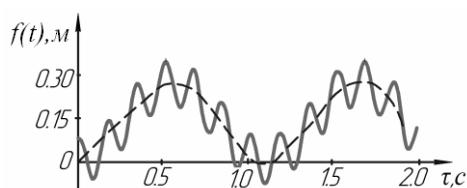


Рисунок 3. – Поперечные колебания стержня механизма удержания оправки прошивного стана ТПА 140 (труба диаметром 114x12, сталь 20)

Результаты численного анализа дифференциального уравнения (9) продольных колебаний оправки совместно со стержнем механизма ее удержания при прокатке труб диаметром 114x12, материал – сталь 20 на прошивном стане ТПА 140 представлены на рисунке 4.

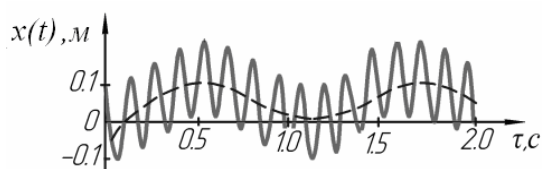


Рисунок 4. – Продольные колебания оправки со стержнем прошивного стана ТПА 140 (труба диаметром 114x12, материал – сталь 20)

Таблица 1

Значения K_0 в разные моменты времени, полученные разными способами

t, c	0,5	1	2	3	4	5	6
K_0	<u>1,2997</u>	<u>1,8218</u>	<u>0,6037</u>	<u>1,3776</u>	<u>0,5575</u>	<u>1,1327</u>	<u>0,2757</u>
	<u>1,2992</u>	<u>1,8217</u>	<u>0,6034</u>	<u>1,3778</u>	<u>0,5574</u>	<u>1,1325</u>	<u>0,2774</u>
	1,2994	1,8215	0,6033	1,3779	0,5572	1,1323	0,2721

Результаты из таблицы 1 свидетельствуют о высокой точности асимптотических зависимостей, из которых проще использовать в инженерных расчётах формулу (18).

На рисунке 5 представлена зависимость коэффициента динамичности K_0 от времени t при возрастании массы системы «гильза (труба) – оправка – стержень», рассчитанная с помощью (16).

График на рисунке 5 свидетельствует о том, что при действии реактивной силы в системе «гильза (труба) – оправка – стержень» с возрастающей массой первый максимум $K_0 < 2$, а последующие максимумы меньше первого. Следовательно, происходит определенная стабилизация виброактивности в системе «гильза (труба) – оправка – стержень», что совпадает с результатами экспериментальных исследований прошивного стана ТПА 140.

Анализ результатов расчета указывает, что математическая модель процессов достоверно описывает динамические явления в системе. Амплитудно-частотные характеристики динамических процессов при

поперечных и продольных колебаниях системы за время реализации всего технологического процесса прошивки трубной заготовки на прошивном стане ТПА 140 превышают допустимый уровень виброактивности [2, 12].

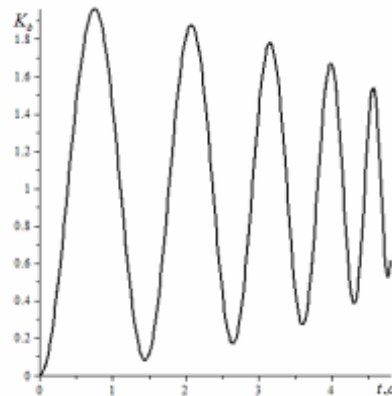


Рисунок 5. – Зависимость коэффициента динамичности K_d от времени t при возрастании массы механической системы прошивного стана ТПА 140 с учётом реактивной составляющей

Виброактивность механической системы влечет за собой образование повышенной разностенности гильз, что при получении готовой продукции в дальнейшем носит сложный и трудноустраняемый характер. Очевидно, что учет интенсивности воздействия очага деформации и переменности массы прокатываемой гильзы, надвигающейся со скоростью $\vec{V}$, является определяющим параметром в рамках выбранной динамической модели стержневой системы.

Возможность комплексного моделирования различных режимов прошивки трубной заготовки на этапе проектирования технологических процессов прокатки труб существенно отличает полученные результаты от результатов ранее известных работ в области исследования динамической устойчивости и виброактивности стержневой системы механизма удержания оправки прошивного стана ТПА.

Выводы

1. Уточнена расчетная схема и математическая модель стержня механизма удержания оправки для рассматриваемой механической системы прошивного стана ТПА. Учтена переменность во времени массы прокатываемой трубы и параметры выходной стороны стана. Представлены результаты численного решения системы дифференциальных уравнений методом Рунге – Кутты, что позволяет в комплексе оценить соответствующие поперечные движения изображающей точки (середины) для характерных форм колебаний стержня и продольные перемещения самой оправки в очаге деформации с учетом переменности во времени массы прокатываемой трубы.

2. Исследование динамики механизма удержания оправки показало, что при нагружении постоянной силой со стороны очага деформации оправки со стержнем и переменности во времени массы всей системы,

максимум коэффициента динамичности перемещений оправки не равен двум. Его значения монотонно меняются в ходе продольных колебаний оправки в очаге деформации. При этом реактивная сила оказывает существенное влияние на динамику оправки со стержнем.

3. На этапе назначения технологических процессов прошивки трубной заготовки путем математического моделирования виброактивности механизма удержания оправки установлены рациональные режимы прошивки с учетом прогнозируемых показателей качества выпускаемых труб и величины допустимого уровня виброактивности стержня оправки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Данченко В.Н. Технология трубного производства. Учебник для вузов. /В.Н. Данченко, А.П. Коликов, Б.А. Романцев, С.В. Самусев //. – М.: Интермет - Инжиниринг, 2002. – 640 с.
2. Потапов И.Н. Новая технология винтовой прокатки./Потапов И.Н., Полухин П.И. // – М.: Металлургия, 1975. – 344 с.
3. Рахманов С. Р. Динамика стрержневой системы механизма удержания оправки прошивного стана трубопрокатного агрегата. Материалы Международной конференции «Современные направления производства сварных и бесшовных труб из черных и цветных металлов», Днепропетровск. – 2007. С. 45 – 51
4. Бессонов А.П. Основы динамики механизмов с переменной массой звеньев. – М.: Наука, 1967. – 279 с.
5. Ольшанский В. П. Моделирование колебаний осциллятора линейно-переменной массы при импульсном нагружении / В.П. Ольшанский, С.В. Ольшанский// Вісник НТУ “ХПІ”: Математичне моделювання в техніці та технологіях, 2013, № 37(2010). – С. 125-130.
6. Cveticanin L. Dynamics of Machines with Variable Mass/ L. Cveticanin. Taylor & Francis Ltd, – 1998. – 300 p.
7. Ольшанский В.П. Метод ВБК в расчетах нестационарных колебаний осцилляторов/ В.П. Ольшанский, С.В. Ольшанский// – Харьков: Місдрук, 2014. – 264 с.
8. Образцов И. Ф. Асимптотические методы в механике тонкостенных конструкций / И.Ф. Образцов, Б. В. Нерубайло, И. В. Андрианов. – М.: Машиностроение, 1991. – 416 с.
9. Новицкий В.В. Дельта-функция и ее применение в строительной механике. Расчет пространственных конструкций. Вып. УШ. /Под ред. А.А. Уманского.// – М.: Гос. изд-во лит-ры по стр-ву, арх-ре и стр. мат-лам, 1962. С. 207 – 244.
10. Янке Е. Специальные функции / Е. Янке, Ф. Эмде, Ф. Лёш – М. : Наука, 1977. – 344 с.
11. Абрамовиц А. Справочник по специальным функциям с формулами и таблицами /А. Абрамовиц, И. Стиган.// – М.: Наука, 1979. – 832 с.
12. Рахманов С.Р., Тополов В.Л. Экспериментальное исследование виброактивности станов винтовой прокатки труб трубопрокатного агрегата. – Вибрация в технике и технологиях, № 2 (62), 2011. С. 91 – 96.

ИЗУЧЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ «КРАСНОГО ШЛАМА» В КАЧЕСТВЕ АКТИВНОЙ ДОБАВКИ

В статье представлены результаты исследования, которые показывают возможность использования «красного шлама» отхода глиноземного производства в качестве добавки активно участвующей в процессах деструкции и синтеза макромолекулы угля.

Ключевые слова: минеральные добавки, красный шлам, катализатор, активные добавки.

У статті представлені результати дослідження, які показують можливість використання «червоного шламу» відходу глиноземного виробництва в якості добавки яка активно бере участь в процесах деструкції і синтезу макромолекули вугілля.

Ключові слова: мінеральні добавки, червоний шлам, каталізатор, активні добавки.

The article presents the results of studies that show the use of "red mud" waste of alumina production as an additive to actively participate in the process of degradation and synthesis of macromolecules coal.

Keywords: mineral additives, red mud, catalyst, supplements.

Введение

В настоящее время наиболее перспективным является метод получения кокса из спекающегося угля с применением минеральных добавок в качестве активных компонентов (катализаторов).

В сложившейся экономической и экологической обстановке Украины целесообразно использовать в качестве активных добавок различные отходы производства, например, шламы либо шлаки.

Наибольший объем техногенных отходов образуется и накапливается именно в горно-металлургическом комплексе [1]. В других отраслях народного хозяйства объем отходов значительно меньше.

Необходимо отметить, что отходы горно-металлургического комплекса, по своему химическому составу, являются наиболее ценными с точки зрения возвращения их в металлургический передел. Привлечение этих отходов в металлургическую промышленность позволит сократить использование железной и марганцевой руд, флюсов, топлива, а также снизить затраты на их добычу и обогащение. Это, в целом, позволит рациональнее использовать природные ресурсы, что повлечет за собой улучшение экологической обстановки на предприятиях и прилегающих территориях, сокращению под отвалы и шламоотстойники плодородных земель.

Влияние различных добавок на процессы, протекающие при термическом пиролизе органической массы угля, носит как физический, так и каталитический характер. Использование активных добавок для управления реакциями в современных технологических процессах является весьма интересным и значимым.

Постановка задачи

Для поиска наиболее эффективных катализаторов (шламов и шлаков) тщательно рассматриваются условия их подбора, одним из которых является использование закономерностей, вытекающих из действия электронных сил. Известно, что гетерогенные каталитические реакции имеют в своей основе электронный механизм, поскольку превращения, вызываемые в реагирующей молекуле каталитической реакции, определяются перемещением валентных электронов. [2]

В углехимических процессах имеют место реакции окисления, гидрирования, дегидрирования, разложения углеводородов, ароматизации и полимеризации. Среди большого ряда применяемых катализаторов, влияющих на эти процессы, одно из первых мест занимают элементы четвертого периода и четвертого ряда периодической системы, начиная с 23 по 28 номер, а именно: V, Cr, Mn, Fe, Co и Ni.

Известной активной добавкой, влияющей на вышеприведенные процессы, являются скелетные железные катализаторы [3]. В работе показано влияние скелетного катализатора на процессы гидрирования ацетиленовых углеводородов.

Приготовление скелетных катализаторов складывается из следующих операций [4]:

- сплавление каталитически активного металла (никеля, железа и др.) с другими неактивными (алюминий, кремний, цинк и др.);

- выщелачивание неактивного металла.

Проведя аналогию процесса получения скелетных катализаторов, а именно, “красного шлама”, который образуется выщелачиванием алюминия из природноспеченного соединения – боксита, можно предположить, что полученный продукт будет также влиять на процессы гидрирования и активно влиять на ход процессов деструкции и синтеза органической массы угля.

Целью данной работы было изучение возможности использования «красного шлама» в качестве активной добавки, влияющей на процессы термического пиролиза спекающегося угля.

Экспериментальные исследования и анализ результатов.

В работе использовался красный шлам, отобранный из шламохранилищ Николаевского глиноземного завода, химический состав которого представлен в таблице 1, а также спекающийся уголь марки «Г» ЦОФ Добропольская. Красный шлам вносился в количестве 0,25; 0,5; 1; и 5%. Состав и свойства составленных смесей показаны в таблице 2.

Таблица 1

Химический состав исследуемого красного шлама

№ п/п	Обозначение химического элемента	Содержание в красном шламе, %
1	CaO	12,1
2	Fe ₂ O ₃	42,2
3	Al ₂ O ₃	14,1
4	SiO ₂	9,4
5	TiO ₂	3,9
6	Na ₂ O	4,1
7	S	1,7
8	прочие	12,5

Таблица 2

**Характеристика смесей для исследования влияния содержания
красного шлама на спекаемость углей**

№ п/п	Содержание красного шлама в смеси, %	Показатели технического анализа, %			
		W ^a	A ^d	S ^d _t	V ^{daf}
1	0	1,8	10,5	0,92	32
2	0,25	1,8	10,8	0,92	32
3	0,5	1,7	11,2	0,93	31,9
4	1	1,9	11,6	0,95	30,4
5	5	1,6	15,4	1,02	29,5

Полученные данные показывают, что введение красного шлама приводит к неоднозначным изменениям показателей технического анализа смесей. Внесение небольшого количества шлама (до 0,5%) приводит к незначительному повышению зольности, сернистости и выходу летучих веществ. При внесении шлама свыше 0,5% показатели резко ухудшаются.

Из положений теории спекаемости гетерогенных углеминеральных смесей известно, что для подробного исследования поведения минеральных частиц при коксовании необходимо изучить все факторы, влияющие на ход процесса коксообразования в присутствии рудных добавок. При детальном рассмотрении этой проблемы можно сказать, что наиболее важными факторами являются: гранулометрический состав, внешняя удельная поверхность и адсорбционная емкость красных шламов.

Таблица 3

Сводная таблица исследования адсорбционной емкости красного шлама

Крупность шлама, мм	Концентрация пека в бензоле, гр				Количество адсорбированного пека	
	1	2	3	ср	г.	%
<0,25	0,171	0,170	0,172	0,171	0,229	57,2
0,25 – 0,5	0,173	0,171	0,172	0,172	0,228	57
0,5 – 1	0,175	0,174	0,173	0,174	0,226	56,5
1 – 1,5	0,175	0,177	0,176	0,176	0,224	56
>1,5	0,178	0,176	0,177	0,177	0,223	55,8

Для предварительного исследования было принято решение по изучению адсорбционной емкости красного шлама. Результаты проведенного исследования, связанного с измерением адсорбционной емкости красного шлама в зависимости от его крупности представлены в таблице 3.

По результатам проведенного исследования построена зависимость адсорбционной емкости красного шлама от крупности (рис. 1).

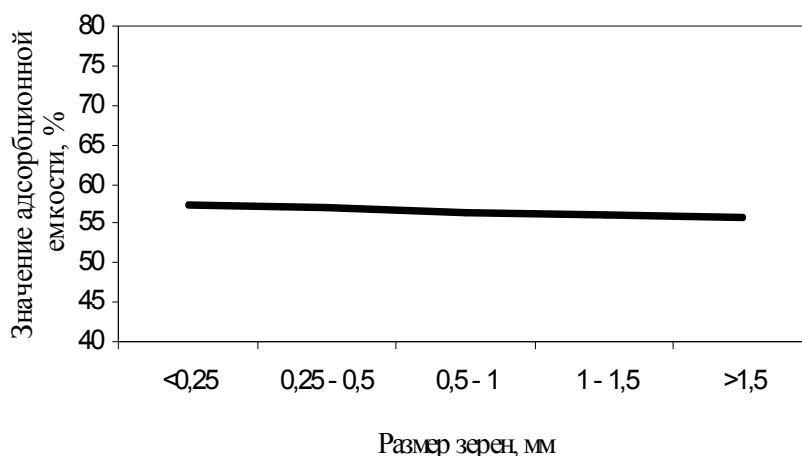


Рисунок 1. – Влияние крупности красного шлама на его адсорбционную емкость

Результаты исследования показывают, что с изменением крупности красного шлама адсорбционная емкость практически не изменяется и находится в пределах от 55,8% до 57,2%. Незначительное влияние на адсорбционную емкость объясняется тем, что частички шлама являются коллоидными, а исследуемая крупность шлама (от >1,5 до <0,25 мм) получена путем измельчения слежавшегося шлама. Следовательно, дальнейшие исследования, связанные с изучением влияния красного шлама на выход и свойства кокса целесообразно проводить, изменяя процентное содержание, а не крупность шлама, так как при различной поверхности исследуемого шлама внесенные рудные добавки будут по разному изменять температурные границы пластического состояния углей, способствовать уменьшению интервала температур, при котором пластичность сохраняется, увеличивать газопроницаемость и вязкость. Все перечисленное, в свою очередь, должно сказаться на силе спекания и прочности конечного продукта.

Для исследования влияния красного шлама на реакции, протекающие при совместном нагревании минеральной и угольной составляющей шихты, было проведено дилатометрическое исследование, результаты которого представлены в таблице 4. Данный метод характеризуется своей оперативностью, хорошей воспроизводимостью результатов, постоянной температурой и, как следствие, повышенной чувствительностью к технологическим свойствам углей и шихт.

Таблица 4

Результаты дилатометрического исследования

№ п/п	Количество добавки красного шлама, %	Ив, мм	Пв, с	Пн, с	$\frac{(I_B \cdot P_B)}{100}$
1	0	15	82	350	12,30
2	0,25	18	85	350	15,30
3	0,5	18	100	350	18,00
4	1	13	100	357	13,00
5	5	9	50	370	4,50

Анализ проведенных исследований показывает, что внесение микродобавок красного шлама отражается на показателях дилатометрического исследования. Так, при добавлении к газовому углю красного шлама, индекс вспучивания (I_B) практически не изменяется и находится в пределах эталонного, что, вероятно, связано с увеличением вязкости в период максимального газовыделения в результате увеличения газопроницаемости [5]. Исключением является лишь внесение максимального количества шлама (5 %), в результате которого, данный показатель снижается с 15 мм до 9 мм, вследствие отошающего действия.

Влияние красного шлама на период вспучивания (P_B) различно. Так, при внесении шлама в небольших количествах (до 1 % включительно) к газовому углю, период вспучивания увеличивается от 82 сек. до 100 сек., что является результатом активности красного шлама. Внесение более 1 % приводит к снижению этого показателя.

Для выбора оптимального количества добавки красного шлама был рассчитан комплексный показатель $\frac{(I_B \cdot P_B)}{100}$, который наиболее ярко характеризует спекаемость рудно-угольной композиции и одновременно учитывает качественные и количественные признаки пластической массы, проявляющиеся на стадии среднетемпературных превращений, устойчивости жидкой части продуктов термической деструкции угля, а также ее способности обволакивать минеральные компоненты.

При внесении микродобавок (до 0,5 %), показатель $\frac{(I_B \cdot P_B)}{100}$ увеличивается с 12,30 (чистый уголь) до 18,00. Необходимо отметить, что его рост обеспечивается за счет значительного увеличения периода вспучивания P_B (табл. 1). Увеличение процентного содержания шлама в смеси приводит к снижению этого показателя. Отсюда следует, что внесение 0,5% красного шлама к газовому углю наиболее позитивно влияет на увеличение вязкости пластической массы в период максимального газовыделения, в результате чего снижается газопроницаемость угольной загрузки и увеличивается вспучивание.

Исследования подтверждают результаты пластометрического исследования (табл. 5).

Таблица 5

Результаты пластометрического исследования

№ п/п	Количество добавки красного шлама, %	Y _{ср} , мм	X _{ср} , мм	Масса остатка, г
1	0	11	41	76,8
2	0,25	11,5	41,5	77,8
3	0,5	12	42	77,9
4	1	10	37,5	77,4
5	5	8	37	78,9

Из полученных данных пластометрического исследования видно, что толщина пластического слоя Y достигает максимального значения при добавлении к углю 0,5 % красного шлама и соответствует 12 мм по отношению к 11 мм чистого угля. Пластометрическая усадка также увеличивается с 41 мм (чистый уголь) до 42 мм (с добавкой 0,5 % шлама). Повышение концентрации шлама в смеси свыше 0,5 % приводит к снижению показателей пластометрического исследования, также как и комплексного показателя дилатометрического исследования в результате расхода определенного количества пластической массы угля на смачивание большей поверхности, что подтверждает показатель периода до начала вспучивания (П_Н).

Таким образом, внесение 0,5% красного шлама к газовому углю наиболее позитивно влияет на увеличение вязкости пластической массы в период максимального газовыделения, в результате чего снижается газопроницаемость угольной загрузки, а также увеличивается вспучивание. Оценку влияния данного фактора проводили при помощи показателя выхода коксового остатка, как на наиболее суммирующий показатель всех процессов взаимодействия компонентов смеси. Для этого был применен дисперсионный анализ [6, 7], который позволяет разложить сложную дисперсию на составляющие и оценить их по определенному критерию (в нашем случае, оценку производили по критерию Фишера).

В результате проведенного однофакторного дисперсионного анализа, были получены следующие результаты:

– Дисперсия фактора (содержание в шихте красного шлама)

$$S_A^2 = 3,6; \tag{1}$$

– Ошибка опыта (дисперсия воспроизводимости)

$$S_R^2 = 0,1; \tag{2}$$

– Средние значения по строкам

$$(B1, A) = 55,44; (B2, A) = 55,28; (B3, A) = 55,6; \tag{3}$$

– Средние значения по столбцам

$$(A1, B) = 55,3; (A2, B) = 56,0; (A3, B) = 57,0; \tag{4}$$

$$(A4, B) = 54,6; (A5, B) = 54,3;$$

– Общее среднее значение

$$Y_{\text{CP}} = 55,4; \quad (5)$$

– Степени свободы

$$f_A = 4; f_R = 10; \quad (6)$$

– Расчетное значение критерия Фишера

$$F_p = 55,9; \quad (7)$$

– Табличное значение критерия Фишера

$$F_T = 5,91; \quad (8)$$

Из полученных данных видно, что расчетное значение критерия Фишера больше табличного значения (для степеней свободы f_A и f_R и заданного уровня значимости $q=0,05$). Следовательно, влияние фактора (содержания красного шлама) превышает уровень ошибки опытных данных, т.е. на выход коксового остатка существенно влияет содержание красного шлама, внесенного в шихту для коксования.

Выводы

Содержание красного шлама – фактор, влияющий на процессы деструкции и синтеза органической массы угля.

Таким образом, на основании полученных данных можно отметить, что красный шлам является активной добавкой, а не инертной, влияющей на ход процессов, протекающих при коксовании угля.

ЛИТЕРАТУРА

1. Носков В.А. Современное состояние брикетирования техногенных отходов на металлургических предприятиях Украины // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2000. – №6. – С.90-94.
2. Кусумано Дж.А., Делла Бетта Р.А., Леви Р.Б. Каталитические процессы переработки угля: Пер. с англ / Под ред. В.П. Семенова. – М.: Химия. – 1984. – 288 с.
3. Вейганд К. Методы эксперимента в органической химии. – М.: Изд-во иностр. Лит. – 1950. – 654 с.
4. Самойленко Г.Е. Исследование влияния активных добавок на сернистые соединения коксующихся углей Донбасса: Дис. канд. техн. наук: 051707. – Днепропетровск. – 1975. – 215 с.
5. Прилепская Л.Л., Исхаков Х.А. Термическая деструкция углей с добавками оксидов железа // Химия твердого топлива. – 1991. – № 4. – С.62-65.
6. Федоров В.В. Теория оптимального эксперимента. – М.: Наука, – 1971. – 312 с.
7. Барский В.Д., Коган Л.А. Практический математико-статистический анализ в коксохимии. – М.: Металлургия, 1975. – 184 с.

УДК621.315.592.2 : 66.012-52

Л.Я. Шварцман, Э.А. Троценко, Е.В. Баженов, В.Н. Додонов

**ПРОЦЕСС ВОДОРОДНОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ ТРИХЛОРСИЛАНА
В МНОГОСТЕРЖНЕВЫХ РЕАКТОРАХ ПОЛУЧЕНИЯ
ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ –
НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ
ТРАДИЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

Аннотация. Выполнен анализ параметров управления процессом водородного восстановления трихлорсилана в «Siemens-Реакторе». Предложен новый подход к решению задачи управления процессом с оптимизацией по критерию «скорость осаждения кремния». Предложен способ определения управляемого параметра, устраняющий увеличение абсолютной ошибки измерения по мере ведения процесса.

Ключевые слова: идентификация, адекватность, многопараметрическая модель, процесс, поликристаллический кремний, Siemens-Реактор, скорость осаждения кремния.

Анотація. Виконано аналіз параметрів управління процесом водневого відновлення трихлорсилана в «Siemens-Реакторі». Запропоновано новий підхід до рішення задачі управління процесом з оптимізацією по критерію «швидкість осадження кремнію». Запропоновано спосіб визначення управляючого параметру, що встановлює збільшення абсолютної помилки виміру по мірі ведення процесу.

Ключові слова: ідентифікація, адекватність, багато параметрична модель, процес, полікристалічний кремній, Siemens-Реактор, швидкість осадження кремнію.

ANNOTATION. The analysis of control parameters for process of reduction of trichlorsilane by hydrogen in the «Siemens-reactor» is carried out. A new approach to solving the task of process control with optimization according to the criterion «silicon deposition rate» is proposed. A method of definition of a controlled parameter that eliminates increasing the absolute measurement error while process management is proposed.

Key words: identification, adequacy, a multi-parametric model, process, polycrystalline silicon, Siemens-reactor, silicon deposition rate.

Более 80% мирового производства поликристаллического кремния (далее ПМК) в виде стержней получают осаждением кремния в Реакторах водородного восстановления трихлорсилана SiHCl_3 (далее ТХС). Наибольшим мировым признанием пользуется технология так называемого «Siemens-Процесса» [1, 2]. Достоинства технологии:

- простота технологической и технической организации;
- невысокая себестоимость расходуемого в реакторе реагента - ТХС;
- возможность эффективного получения ТХС с показателями чистоты, гарантирующими заданное качество конечного продукта - ПМК;
- высокая скорость осаждения кремния из газовой фазы в процессе формирования поликристалла в «Siemens-Реакторе»;

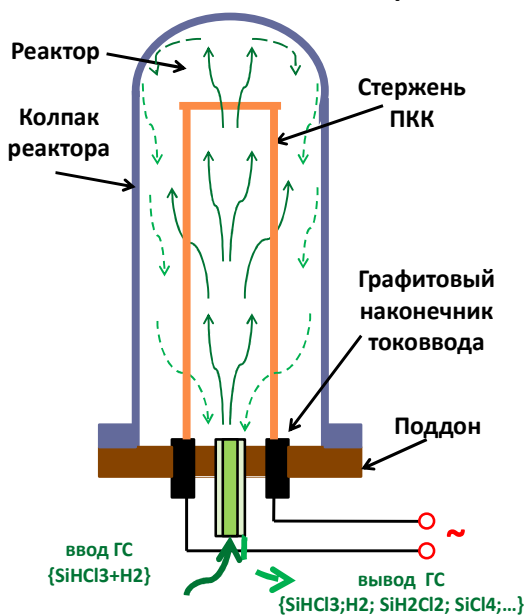
- высокий уровень извлечения из ТХС кремния при его осаждении из газовой фазы в процессе формирования поликристалла в «Siemens-Реакторе».

Простота (в сравнении с альтернативными вариантами получения ПКК) и эффективность технологии сделали «Siemens-Процесс» своего рода мировым стандартом. Несмотря на многолетний опыт развития «Siemens-Процесс» остается интересным сложным производственно-технологическим комплексом с рядом перспективных направлений дальнейшего совершенствования. Направления поиска - оптимизация как общей схемы во всем объеме технологических операций и переделов, так и в направлении совершенствования непосредственно процесса в самом «Siemens-Реакторе».

Обширность вопроса в данной работе сужена до рассмотрения некоторых аспектов решения задач управления сложным многосвязным процессом формирования поликристалла непосредственно в «Siemens-Реакторе». Рассматривается управление процессом с использованием много параметрической прогностической модели, использующей в качестве управляемого (характеристического) параметра скорость наращивания стержня ПКК и ее соотношение с уровнем извлечения кремния из ТХС в соответствии с регламентом «идеального процесса».

Суть технологического процесса в «Siemens-Реакторе» состоит в восстановлении очищенного ТХС, находящегося в газообразном состоянии в газовой смеси (далее ГС) с водородом, до чистого кремния. Перевод кремния в твердое состояние реализуется реакцией термо деструкции ТХС. Осаждается кремний на так называемые стержни-подложки. Общая конструкция Реактора может быть описана схемой, приведенной на рис. 1.

**Схема (упрощенно) Реактора
водородного восстановления ТХС производства ПКК.**



**Рисунок 1. – Схема реактора водородного восстановления
ТХС производства ПКК**

Нагрев стержней ведется электрическим током. Приведенные затраты электроэнергии процесса восстановления составляют 70 кВт·ч/кг ПКК.

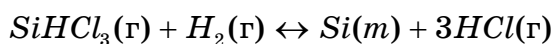
Осаждение кремния производится на стержни-подложки, закрепляемые нижним торцом на токо вводах, проходящих через поддон, и с помощью перемычек сверху объединяемых попарно в U-образные блоки. Конструкцией реакторов определена загрузка стержней в количестве от 2 до 96 единиц. Компоновку стержней в реакторе и вид готовых изделий показано на рис.2.



Рисунок 2. – Стержни ПКК по завершению процесса

Система подачи и эвакуации ГС реализована в виде распределенных по поддону пар патрубков. ГС водорода и ТХС подается в реактор через внутренний патрубок пары, выводится из реактора - через внешний патрубок. Такая реализация схемы питания реактора газовой смесью обеспечивает рекуперацию тепла, обеспечивая подогрев вводимой в

реактор ГС. Система питания реактора газовой смесью обеспечивает продольное, вдоль поверхности стержней перемещение(проток) реагентов, вступающих между собой в реакцию. Объемный расход газовой смеси 1500 м³/час. Процесс характеризуется многообразием химических реакций, порождаемым наличием промежуточных этапов. Как правило, рассматривается шесть основных реакций, для краткости укажем две:



Материальный баланс процесса представлен в таблице 1. Уровень извлечения кремния из ТХС составляет 13 – 16% % - в соответствии с условиями ведения процесса. ГС из реактора направляется в систему конденсации на регенерацию хлорсиланов до ТХС, используемого в рецикле смешения с водородом для подготовки ГС на подачу в реактор.

Таблица 1

Материальный баланс процесса водородного восстановления трихлорсилана

Реакция	$27SiHCl_3 + 81H_2 = 4Si + 86H_2 + 10SiCl_4 + SiH_2Cl_2 + 3HCl + 12SiHCl_3$			
Коэффициент	Вещество	Молекулярный вес	Расход веществ, г-моль	кг/ч одна установка
<i>Вход</i>				827,21
27	$SiHCl_3$	135,5	3658,5	792,13
81	H_2	2	162	35,08
<i>Выход</i>				827,21
4	Si	28	112	24,25
86	H_2	2	172	37,24
10	$SiCl_4$	170	1700	368,08
1	SiH_2Cl_2	101	101	21,87
3	HCl	36,5	109,5	23,71
12	$SiHCl_3$	135,5	1626	352,06

Диаметр исходных кремниевых стержней-затравок составляет 6 - 8 мм, длина 2200 мм. Регламентный процесс ведется в течение 120-150 ч, определяя диаметр готовых кремниевых стержней величиной до 150 мм. После этого процесс завершают в режиме обеспечения постоянной скорости охлаждения (регламентируется 250°С/ч). Нарушение регламента приводит к образованию трещин или полному разрушению стержней – как

следствие высоких термических напряжений в стержнях ПКК. Напряжение питания электротокком полностью снимают при достижении температуры стержней 450°C. Реактор переводят в режим продувки камеры водородом. При достижении температуры окружающей среды камеру переводят на продувку азотом, после чего открывают купол и демонтируют готовые стержни ПКК. Процесс завершен. На фото общий вид готовой к отправке из цеха продукции – стержни ПКК (рис. 3).



Рисунок 3. – Стержни ПКК после демонтажа из Реактора

Состав ГС задается объемным соотношением водорода к ТХС. Как правило, это соотношение 3:1, но может варьироваться при корректировках хода процесса. Процесс ведется при избыточном давлении, составляющем 6 атм, и температуре 1100°C.

В принятой концепции управления, указанные значения параметров определены как регламентные. Регламент обеспечивает стабильное и прогнозируемое ведение процесса с точки зрения термодинамики химических реакций, баланса кинетических характеристик этих реакций и конструктивных параметров реактора.

Интенсификация процесса за счет повышения давления ГС в реакторе, вызывающее увеличение скорости наращивания стержня ПКК, возможна, но мало эффективна (рис.4).

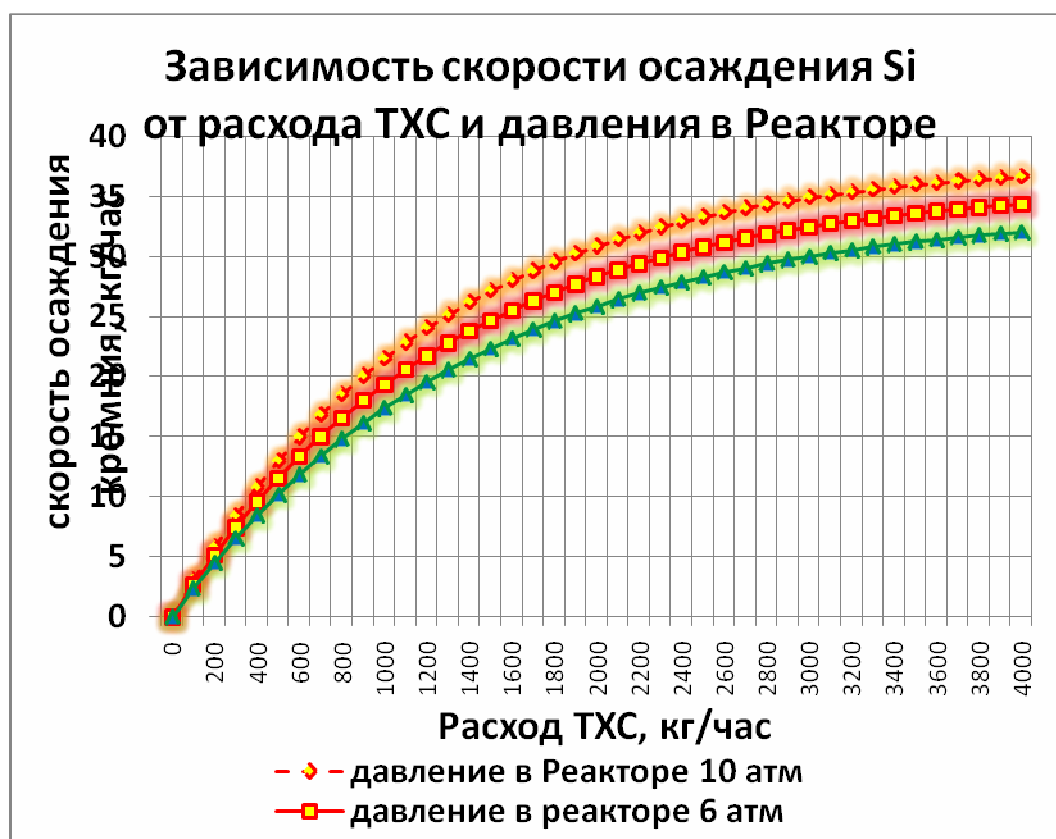


Рисунок 4. – Влияние давления в Реакторе на производительность по Si

Низкая эффективность повышения давления определена в силу термодинамических особенностей реакций – объем продуктов реакций незначительно меньше объема исходной ГС (см. таблицу 1). Баланс конструктивных ограничений, определяемых требованиями безопасности ведения процесса, и эффекта повышения производительности процесса от увеличения давления в реакторе определил регламентное значение 6 атм, как указано ранее по тексту.

Оптимизация процесса за счет увеличения температуры стержней ПКК, так же интенсифицирующая скорость наращивание стержня - сомнительна. Причина неоднозначности состоит в высоком риске брака по образованию дендритов, так называемого “попкорна”, по нарушению геометрии стержня и пр. - как следствие отсутствия точного измерения температуры, определяющей баланс названных высокотемпературных параллельно идущих процессов. Как пример. Для процесса характерен так называемый “эффект самовыравнивания”: местное отклонение диаметра стержня от диаметра рядом находящихся участков приводит к появлению градиента температуры - участки стержня с меньшим диаметром становятся участками с увеличенным электрическим сопротивлением, соответственно увеличивается их нагрев, растет температура, и, как следствие, создаются условия более интенсивного осаждения кремния. Процесс самопроизвольный. При высоких температурах и отсутствии объективных высокоточных средств ее измерения и регулирования

значительно увеличивается вероятность появления таких участков смещения температуры в область значений, превышающих регламентные. Эффект роста производительности нивелируется процессами ухудшения качества - вплоть до аккумуляции условий, приводящих к преждевременному прерыванию процесса.

В традиционных схемах управления Siemens-Реактором в качестве основного параметра управления используется температура поверхности стержней-подложек[1, стр. 235; 3, 4]. Проблемы прямого и точного измерения этого параметра остаются актуальными и сегодня. На практике задача решается путем использования эмпирически устанавливаемой зависимости температуры стержня от силы питающего электрического тока (с теми или иными особенностями выражения этой зависимости) основным управляющим параметром. Параметры выделены как основные в силу уровня значимости их воздействия на процесс, а так же их высоких динамических характеристик в сравнении с высокой инерционностью процесса накопления осаждаемого кремния. Не менее важные параметры процесса (объемный расход и температура ГС на процесс, концентрационные соотношения водорода и ТХС в ГС, схема подачи ГС в Реактор, и др.), как правило, рассматриваются как возмущающие воздействия.

Сложившийся в ходе процесса баланс реакций определяется температурой поверхности стержней-подложек, соотношением показателей распределения концентрации реагентов вдоль поверхности стержней-подложек, баланса кинетических характеристик химических реакций и скорости физических процессов диффузии кремния. Нарушение баланса параметров приводят к негативным последствиям, проявляющимся в падении качества поликристаллов (образование крупных кристаллов, рост дендритов, формирование так называемого “попкорна”, включений газовых пор, и др.) или завершении процесса по аварии (осаждение аморфного кремния и замыкание внутри Реактора цепей электропитания, образование трещин - как правило, на перемычках, и пр.).

В конечном счете, наиболее информативным параметром оценки хода процесса, оптимальным для использования в качестве управляемого параметра ведения процесса была бы скорость осаждения кремния на поверхности стержня-подложки. Но, те же проблемы отсутствия способов прямого и точного измерения этого параметра решаются традиционно – пересчетом функционально связанных параметров, измерить которые представляется возможным. В качестве такого параметра, например, может быть использована скорость увеличения диаметра стержня, в соответствии с регламентом ведения процесса составляющая величину 0,8–1,2 мм в час. Реализуемые способы контроля параметра в этом случае базируются на прямом измерении диаметра стержня или измерении веса стержня по ходу процесса.

Выбирая в качестве оптимизируемого критерия производства показатели технико-экономического характера, задача выносится за рамки управления реактором. Решение задачи в таком формате имеет результатом техническое задание на ведение процесса в каждом отдельно взятом реакторе – соотношение скорости осаждения кремния и уровня извлечения кремния из ТХС в ходе процесса. Решение технико-экономической задачи обеспечивает систему управления технологическим объектом однозначным формально выраженным заданием, определяющим количественное соотношение этих двух параметров (скорости осаждения кремния и уровня извлечения кремния из ТХС), имеющих обратную функциональную зависимость [1, стр. 236]. В этом случае управление процессом сведется к выбору режимов, обеспечивающих максимальную скорость осаждения кремния - в ограничениях по качеству получаемого поликристалла и уровню извлечения кремния из ТХС. Реализация предлагаемого подхода позволит изначально упростить постановку задачи управления, исключив проблему поликритериальности.

Сложная взаимосвязь параметров, характеризующих процесс, предопределяет актуальность применения многопараметрических моделей, позволяющих прогнозировать оптимальную траекторию ведения процесса, “привязав” ее к задаваемым параметрам “идеального процесса”. В этом случае задача становится монокритериальной, и процесс ведется по единому управляемому параметру – по скорости наращивания стержня ПКК. Так как для физического процесса осаждения кремния на стержень-подложку свойственно явление “самовыравнивания диаметра стержня”, то в качестве оценки качества регулирования целесообразно выбрать минимум отклонения управляемого параметра от предписанного “идеальным процессом”.

Предлагаемый подход обеспечивает уменьшение зависимости абсолютной ошибки измерения от стадии процесса - что характерно для методов, ориентированных на измерение диаметра стержня (слитка). Эта зависимость, и что - в высшей степени отрицательно - сказывается на поздних этапах ведения процесса, когда диаметр стержня имеет значительные габариты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сложность многосвязных физико-химических процессов, интегральным результатом которых является комплексный показатель - скорость осаждения кремния на поверхности стержня-подложки, определяет задачу синтеза модели для многоканального комплекса регулирования процессом водородного восстановления ТХС.

Задача должна решаться в ограничениях, заданных изначально технико-экономическими показателями - оптимизируя соотношение характеризующих процесс параметров - “**скорость осаждения кремния**”: “извлечение кремния из ТХС” - для каждой стадии процесса.

Результатом решения задачи является так называемый “идеальный процесс” – временной регламент контролируемых и управляющих параметров процесса. Регламентное ведение процесса обеспечит максимальное приближение к заданному соотношению характеризующих его параметров. Достижение оптимальности ведения процесса обеспечивается регулированием по выбранному закону одного из указанной пары параметров. В качестве такового выбран параметр **“скорость осаждения кремния”** – как доступный для измерения (вычисления) способом, обеспечивающим приемлемую точность и оперативность получения текущих оценок параметра.

Реализация перспективной концепции управления предполагает решение задачи обеспечения модели процесса объективной параметрической информацией максимально достижимой точности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Технология полупроводникового кремния/Фалькевич Э.С., Пульнер Э.О., Червонный И.Ф.,Шварцман Л.Я.,Яркин В.Н. –М.:МЕТАЛЛУРГИЯ, 1992.-408с.
2. Оптимизация процесса выращивания кремниевых основ для производства поликристаллического кремния/Реков Ю.В., Червонный И.Ф., Егоров С.Г., и др.//Прикладная физика и Материаловедение. 2011 -3/15-19.
3. Алгоритм управления Siemens-Реактором производства поликристаллического кремния /Козин К.А., Горюнов А.Г., Левинцев С.Н., и др. // Известия Томского политехнического университета, 2009. №5 /том 315/. с.70 – 74.
4. Пат. США 20090229991 A1,Устройство и способ для получения равномерного распределения температуры в кремниевых стержнях во время процесса осаждения / Peter Wallmeier–US12/400,984; заявл. 10.03.09; опубл. 17.09.09.

УДК 681.518.5

Безуб В.Н., Карасевич А.В.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ И БЕЗОПАСНОСТИ АСУТП МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

Аннотация. В статье описана система, выявляющая причины пропадания важнейших логических сигналов и способствующая устранению нарушений штатного режима работы оборудования посредством логического контроля последовательности срабатывания сигналов с запоминанием события по времени при первой фиксации факта сбоя.

Ключевые слова: автоматизированные системы управления, информационная целостность, контроль целостности систем управления.

Анотація. У статті описана система, що виявляє причини пропажі найважливіших логічних сигналів і сприяючи усуненню порушень штатного режиму роботи устаткування за допомогою логічного контролю послідовності спрацьовування сигналів із запам'ятовуванням події за часом при першій фіксації факту збою.

Ключові слова: автоматизовані системи управління, інформаційна цілісність, контроль цілісності систем управління.

Summary. In article the system establishing the reasons of loss of the major logical signals and promoting elimination of violations of a regular operating mode of the equipment by means of logical control of sequence of operation of signals with storing of an event on time at the first fixing of the fact of failure is described.

Keywords: automated control systems, information integrity, control of integrity of control systems

Комплекс технических средств (измерительных, регулирующих, исполнительных, по сбору и обработке информации всех видов и т. д.) во взаимодействии с объектом управления и человеком (оператором, диспетчером, контролёром, руководителем участка) на основе рационально построенных форм и потоков информации образует автоматизированную систему управления (АСУ). В современную АСУ входят устройства для первичного формирования, автоматического извлечения и передачи, логической и математической обработки информации, устройства для представления полученных результатов, выработки управляющих воздействий и исполнительные устройства.

Автоматизация производства от степени задействования в процессе человека существенно различается - от частичной автоматизации до полной системы автоматического контроля. Рассмотрим комплексно автоматизированную систему, так как она является хорошим примером автоматизации с использованием полного набора подсистем и обратной связью для воздействия на объект управления (рис. 1).

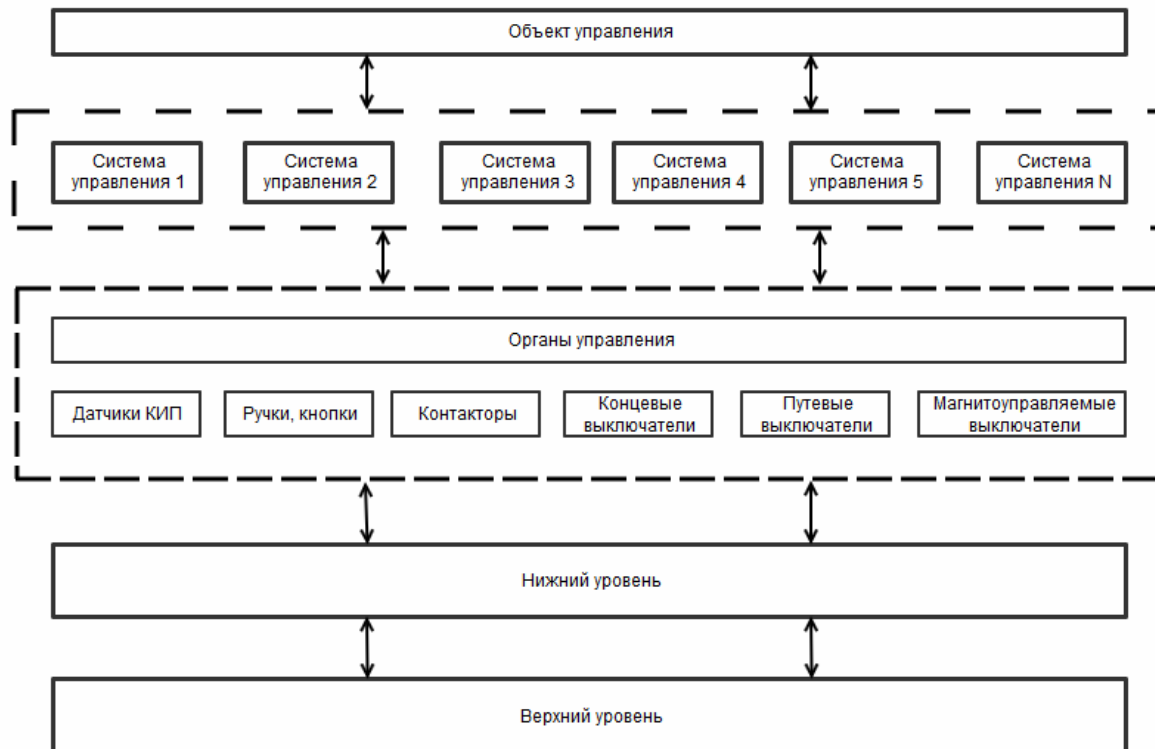


Рисунок 1. – Комплексно автоматизированная система

В последнее время кроме этих классических функциональных блоков добавляется система, контролирующая работу одного или нескольких функциональных блоков. На рис. 2 показано, как они группируются по функциональному, информационному и конструктивно-технологическому признакам, образуя на унифицированной элементной базе блочные наборы, из которых составляются необходимые агрегатные комплексы средств автоматизации.

Широкий интерес к защищенности промышленных систем возник не так давно, после серии инцидентов со специализированными компьютерными вирусами, такими как Flame и Stuxnet. Тогда выяснилось, что различные организации могут использовать в своих целях недостаточное внимание к информационной безопасности систем АСУ ТП. На волне этого много исследовательских лабораторий, центров, институтов начали заниматься анализом уязвимостей систем АСУТП. Большинство этих исследований касается кибер атак, промышленного шпионажа, вмешательств разведок иностранных государств, забывая о человеческом факторе, халатности, лени или мести обиженных сотрудников. Вектор направленности исследований проблематики можно увидеть в списке литературы.

Основная информация, циркулирующая в системах технологического управления – это информация о технологических процессах и управляющих воздействиях. Обладание этой информацией без физического доступа к объекту управления не дает возможности совершить кражу, что

резко ограничивает круг потенциальных нарушителей. Риски, связанные с мошенническими операциями в АСУТП, можно ограничить действиями внутреннего нарушителя – собственного персонала компании или компаний-партнеров. К примеру, для реализации схем с модификацией данных по расходу топлива на автозаправке надо иметь возможность слива и реализации этого топлива.

Наиболее распространенные угрозы безопасности связаны с монетизацией киберпреступности, т. е. с получением денежной выгоды от реализации тех или иных атак на инфраструктуру предприятия, промышленный шпионаж и в редких случаях – шантаж и заказные акции против конкурентов. Не смотря на это, АСУТП до последнего времени не являлись привлекательными для потенциального внешнего нарушителя. Остальные инциденты являются немонетизируемыми: месть уволенных работников, нарушение функционирования вредоносным кодом, случайные взломы хакерами.

Из вышеописанного следует, что количество публично известных нарушений функционирования подобных систем крайне невелико. Кроме того, в случае серьезных нарушений функционирования процессов, контролируемых системой управления, борьба с последствиями не будет отличаться от борьбы с техногенной аварией. Системы технологического управления рассчитываются на быстрое восстановление после сбоев как в случае автоматизации, так и без нее.

Однако низкая вероятность внешних атак на системы АСУТП не снижает актуальность угроз для систем управления. Согласно общепринятой практике, актуальность угрозы пропорциональна как вероятности реализации угрозы, так и возможному ущербу от ее реализации, а если говорить о возможном ущербе от реализации угрозы, тогда системы управления, особенно системы управления опасными производственными циклами или системы жизнеобеспечения целых городов и областей, будут вне конкуренции.

Возможный ущерб от реализации подобных атак включает, кроме финансовых потерь, репутационные риски и риски, связанные с потерей здоровья и жизни, а также риски возникновения экологических катастроф. Даже единичное нарушение функционирования систем технологического управления может привести к катастрофическим последствиям. Подобные инциденты в системах технологического управления, при их обнародовании, вызывают большой общественный резонанс.

По причине практически отсутствующей огласки про нечастые случаи кражи конфиденциальной информации или возникновении специализированных вирусов, способных создать аварийную ситуацию на производстве, компании, проектирующие комплексы АСУТП для промышленных предприятий, часто не заботятся о создании мер безопасности производства и контроле целостности информации. Некоторые компании-разработчики средств автоматизации создают отдельные

компоненты, повышающие уровень контроля и безопасности, но охватить все возможные варианты задач практически невозможно. Так же значительную роль играет неведение заказчика относительно всех возможностей средств автоматизации, что только усугубляет ситуацию.

Например, один из громких и резонансных инцидентов, показывающим уязвимость и возможность эксплуатации данной уязвимости сетей управления на практике, явился обнаруженный в июле 2010 г. вирусный код Stuxnet, который фактически является первым в истории вирусом, способным портить не только данные и программный код, но и вполне реальные машины и оборудование. Его появление не только выявило очередные уязвимости в операционных системах Microsoft, но и устремило взоры специалистов по информационной безопасности в абсолютно новую для них область – безопасность промышленных систем. Способ распространения, направленность и деятельность внедренного вируса в промышленность говорит о специализации вируса на крупные промышленные и стратегические объекты.

Следствием этого является необходимость создания системы безопасности в автоматизации, которая должна базироваться на безопасном выполнении поставленных задач перед технологическим персоналом, а также на максимально возможном воспрепятствовании возникновению аварийных ситуаций. Решение подобных задач позволит выявить потенциальные риски в комплексах АСУТП с помощью системы диагностики и контроля, которая сможет обеспечить исправное состояние ключевых узлов, и поможет уменьшить влияние человеческого фактора.

Из опыта эксплуатации средств АСУТП на различных предприятиях, можно сделать вывод об отсутствии действительно эффективных многоуровневых систем защиты в большинстве случаев. В некоторых случаях были замечены попытки решить проблемы безопасности самим обслуживающим персоналом с помощью стандартных средств, но подобные решения оставляют желать лучшего.

Когда проблемами безопасности занимаются неспециалисты в области безопасности или небольшой круг энтузиастов, они исходят из имеющегося у них опыта, при этом устраняя одни проблемы и создавая другие.

Ниже (таблица 1) приведены основные факторы, влияющие на уязвимость действующих систем по тем или иным причинам.

В настоящий момент, для унификации и типизации процессов и технологий существует целый ряд стандартов и рекомендаций. Заслуживают внимания и тщательного анализа и рекомендации производителей. Одним из примеров таких практических рекомендаций может быть руководство по проектированию и внедрению конвергированной Ethernet сети предприятия (Converged Plantwide Ethernet Designand Implementation Guide), разработанное компаниями Cisco и Rockwell Automation. Назначение этого документа – определение эталонных сетевых архитектур, ориентированных

на применение на производственных предприятиях и облегчающих объединение промышленных и корпоративных сетей с учетом требований по безопасности.

Таблица 1

Большое количество «собственных» разработок программно-аппаратных решений при создании АСУ ТП	
Длительный срок эксплуатации систем	
Закрытость систем	– Разработка в расчете, но выполнение в доверенной среде закрытых индустриальных сетей – Использование специализированных протоколов и средств связи, а также часто низкая скорость их работы – Отсутствие ревизий систем и кода на безопасность – Разработка без учета лучших практик разработки безопасного кода
Фиксированные конфигурации	– Отсутствие возможности своевременного обновления ПО и установки последних исправлений безопасности – Отсутствие возможности установки наложенных средств безопасности (например, антивирусного ПО) и их своевременного обновления – Использование паролей и настроек безопасности по умолчанию, включая настоятельные рекомендации производителя не менять данные значения
Производительность	– Системы технологического управления оперируют информацией в реальном времени, дополнительные проверки систем безопасности мешают
Открытые стандарты	– Новое поколение систем технологического управления работает на открытых стандартах (прежде всего протоколы TCP/IP). При этом, даже, в случае разделения сетей (технологической, офисной, сети Интернет) связи сохраняются для технологических нужд (пересылка информации, удаленное управление)
Консервативный подход к проблемам безопасности (закрывающийся, как правило, в периметровой защите и разделении сетей). Возможности управления доступом в рамках прикладных систем ограничены	
Информация (технологическая) не является основным объектом защиты систем, часто не является конфиденциальной	
Основной объект защиты – управляющее воздействие	

В настоящее время, инфраструктура ПАО «ЕВРАЗ–ДМЗ им. Петровского» так же нуждалась в доработке своей системы безопасности, в первую очередь - обезопасить существующие системы автоматизации от человеческого фактора, т.е. от случайного или намеренного воздействия обслуживающего персонала, действия которого могут привести к трагическим последствиям или техногенной катастрофе. Подобными и другими вопросами промышленной безопасности существующих автоматизированных систем в доменном цехе активно последние четыре года занимаются специалисты отдела эксплуатации АСУТП при содействии научных работников Днепропетровской металлургической академии.

На рис. 2 приведено достигнутый результат – многоуровневая системы защиты и контроля.

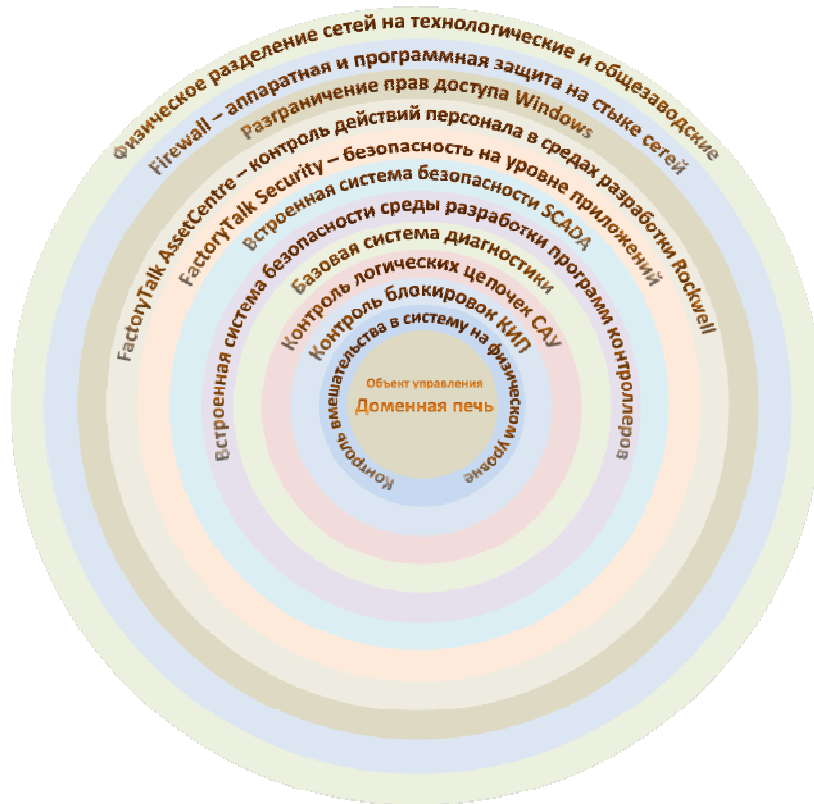


Рисунок 2. – Многоуровневая системы защиты и контроля

Немаловажную роль стоит отводить поддержке используемого программного обеспечения, а именно своевременному обновлению операционных систем, технологического и промышленного ПО, запрет на использование нелегальных приложений и использование антивируса. В настоящий момент уже прекращена поддержка таких распространенных операционных систем, как Windows XP и Windows 7, поэтому, в целях безопасности, необходимо рассмотреть переход на ОС нового поколения, поддерживаемые и обновляемые разработчиком. Этот вопрос касается и программного обеспечения верхнего уровня – средства программирования промышленных контроллеров и SCADA-системы, в последних версиях которых уделено много внимания вопросам безопасности и защиты информации, разграничение прав действий и функций пользователей и их тщательной настройке.

Следующим этапом необходимо обеспечить внутреннюю безопасность системы, а именно контроль и анализ действий технологического и обслуживающего персонала. На ПАО «ЕВРАЗ – ДМЗ им. Петровского» уже реализовано и функционирует в течение нескольких лет подсистема аудита верхнего и нижнего уровней, фиксирующая все действия персонала. С её

помощью возможно выяснить, кто, когда и каким образом выполнял изменения в системе нижнего и верхнего уровней, начиная от подключений к серверу визуализации заканчивая изменениями, вносимыми в логические контроллеры. Подсистема аудита, функционирующая немногим более трех лет, уже успела доказать свою эффективность, позволив выявить несоответствия между регистрацией действий самим дежурным персоналом с фактически выполняемыми изменениями. К тому же, использование аудита изменений позволяет выявить сотрудников, выполнивших неквалифицированные действия, которые, в иных случаях, могли привести к необратимым последствиям.

Большую роль в технологическом процессе играет и подсистема сигнализаций. С ее помощью, технологический персонал может увидеть сообщаемые системой АСУТП отклонения в своей работе и немедленно принять соответствующие меры по восстановлению штатного функционирования. Сообщения имеют вид всплывающих окон или мерцающих надписей, и представляющих в графическом виде узел системы, в котором произошло отклонение заданных параметров, позволяя персоналу быстро определить значимость проблемы и необходимости вызова соответствующей службы для ее устранения. Одновременно с этим присутствует сводка всех поступающих аварийных сообщений, которые будут отображаться до момента подтверждения их просмотра.

В виду того, что доменное производство сопряжено с определенными рисками возникновения критических ситуаций, множество узлов и механизмов системы оснащено блокировками, выполняющими функции аварийного останова работы части системы. К таким объектам можно отнести баллоны, работающие под давлением, трассы доменного и природного газов и другие объекты, способные создать угрозу катастрофического или техногенного характера. Для отслеживания и анализа сработавших блокировок, технологическому персоналу предоставляется отчет в виде таблицы с количеством срабатываний и значениями параметров.

Одна из подсистем, внедренных в АСУТП в последнее время, является подсистема контроля логических цепей ПЛК, и направлена на анализ работы механизмов в нижнем уровне, т.е. на уровне логических контроллеров, призвана повысить контроль над последовательностью возникновения неисправностей логических цепей. В комплексах АСУТП описывают различные узлы системы в основном с помощью языка программирования LadderDiagram, представляющим собой набор логических сигналов, объединенных в общую цепь, и имеющих на выходе цепи результаты конъюнкции и дизъюнкции этих сигналов. Простейшими элементами языка являются контакторы, которые можно образно уподобить контактам реле или кнопки. Контакты отождествляются с переменными, а состояние контакта является значением переменной. Результат на выходе определяет управляющие сигналы для работы

механизмов, разрешение и запрет на их работу, и согласованную работу всех механизмов системы в целом.

Диагностика состояния логических цепей затруднена, поскольку цепь отображает только текущее состояние, и определить ее предыдущее состояние, например причину отключения, не представляется возможным. Данная подсистема позволяет отследить последовательность отключения сигналов цепи, и оперативно выявить истинную причину некорректной работы ключевых логических цепей, наглядно представляя изменение состояния цепи в разные промежутки времени. Все измененные состояния наблюдаемых цепей записываются в систему длительного хранения данных, позволяя накапливать статистическую информацию и выявлять тенденцию нарушенной работы устройств.

В целом, ниже (таблица 2) приведен перечень мероприятий, который должен стать базовым стандартом.

Таблица 2

Предотвращение ошибок персонала	Предотвращение преднамеренных («хулиганских») действий сотрудников
– формирование требований по защите информации в процессе разработки и внедрения систем АСУ ТП; – организация мониторинга действий персонала и состояния критичных компонентов АСУ ТП; – проведение обязательного повышения квалификации персонала, занятого обслуживанием АСУ ТП; – тщательный подбор и подготовка персонала для решения поставленных задач, включая личную ответственность за совершаемые действия.	– ограничение полномочий пользователей в использовании программной среды АСУ ТП рамками их должностных обязанностей; – контроль работы с переносными устройствами и устройствами ввода/вывода; – применение строгой аутентификации при доступе к программной среде АСУ ТП; – формирование строгой антивирусной политики и повсеместное применение средств антивирусной защиты; – проведение регулярных инструктажей об ответственности, возложенной на сотрудников, занятых в эксплуатации ключевых компонент АСУ ТП; – резервное копирование ключевых компонент АСУ ТП и средств, задействованных в обеспечении их безопасности; – автоматизированный мониторинг состояния защищенности ЛВС АСУ ТП.

Автоматизированные и автоматические системы технологического управления прочно интегрированы в современное промышленное производство. Вероятность атаки на подобные системы ниже, чем на многие другие, но ответственность, связанная с их защитой, в некоторых случаях несоизмеримо выше.

В процессе внедрений АСУ ТП во многих случаях меры по безопасности начинаются и заканчиваются на границе между технологическим и корпоративным сегментами ЛВС. Но чтобы противодействовать современным угрозам в сфере АСУ ТП, недостаточно

поставить межсетевой экран на границе и установить на серверах и АРМ антивирус. Нужно применять технологии безопасности ниже, внутри АСУ ТП, на уровне серверов, ПЛК и интеллектуальных датчиков и исполнительных механизмов.

Экономический эффект от внедрения систем безопасности будет достигаться за счет снижения простоев агрегатов, возможности ретроспективного анализа причин сбоев в работе оборудования, а также снижения расхода человеческих ресурсов на восстановление хронологии аварийных ситуаций. Кроме того, дальнейшее развитие систем безопасности позволит значительно эффективнее выявлять проблемные узлы в комплексах промышленного оборудования и таким образом повышать общий показатель экономической эффективности предприятия.

Комплексная система, контролирующая работу остальных функциональных блоков на данный момент отсутствует, зато есть готовые решения от различных корпораций, с разной функциональной нагрузкой. То есть, нет комплексного решения, которое смогло бы отслеживать все изменения и вмешательства на всех уровнях нашей системы автоматизированного управления. Различные службы, обслуживающие подсистемы приносят свой процент неточности на окончательные данные, так неправильно настроенный датчик искажает полноту картины. При увеличении и разветвлении АСУ, ввод специалистов КИП, электроотдела, весового оборудования или, к примеру АСУ увеличивают возможность влияния человеческого фактора, наводок, сбоев, несанкционированного доступа и т.д. которые нужно выявлять, архивировать, прогнозировать и предупреждать их появление. Данную проблему рассмотрим детальнее, так как есть готовые внедренные решения от концерна производителя программно-технических комплексов автоматизации Allen – Bradley.

Стандартный режим работы системы – автоматический, однако вмешательства в ее работу неизбежны по двум основным причинам: физические неисправности отдельных узлов при штатной работе и необходимость проведения наладочных работ во время ремонтов. Поскольку нештатные ситуации грозят простоями производства, их устранение требует принятия оперативных решений. Все вмешательства должны производиться обдуманно, с соблюдением мер безопасности и согласоваться с другими службами, однако на практике оказалось, что временно «обойти» неисправность при помощи изменений логики контроллеров значительно быстрее, чем устранить саму неисправность. Так как подобные манипуляции зачастую являются прямым нарушением техники безопасности, то записи о них не производились. Как следствие, неисправности не ликвидировались вовсе, а о внесенных изменениях персонал мог забыть, что грозило новыми нарушениями в работе системы и создавало риски, как для жизни персонала, так и для оборудования.

Как пример можно привести такую ситуацию по САУ “Загрузка” доменной печи: при обычной работе коксовый или рудный бункер

открывается только при выборе в программе соответствующего материала, но для ремонта затвора бункера, чтобы была возможность открывать и закрывать его без зависимости работы остальной системы исключается проверка вида материала. Данные об этом действии не были занесены в дежурный журнал. Поэтому по завершению ремонта блокировка не была восстановлена, что привело к одновременному высыпанию двух порций материала в один скип (рис. 1).



Рисунок 3. – Последствия исключения проверки заданного материала

Разбор происшествий существенно усугубляет отсутствием фиксации действий в системе управления. Поскольку дежурный персонал АСУТП, дежурный электрик и сменный технологический персонал работает в одних и тех же бригадах, для снижения коллективной ответственности зачастую предоставляется недостоверная информация о производимых ими действиях, либо вообще замалчивается.

В итоге практически невозможно достоверно и точно оценить принимаемые персоналом решения, произведенные вмешательства в систему на разных уровнях, а также, в случае возникновения аварийных ситуаций или простоев, восстановить картину происшествия, и проанализировать действия персонала или поведение механизмов.

На ПАО «ЕВРАЗ - ДМЗ им. Петровского» в доменном производстве используются промышленные программируемые контроллеры компании Allen-Bradley, поэтому рассмотрим детальнее программное предложение AssetCentre Rockwell Software. Данный продукт предназначен для контроля действий персонала, который обслуживает нижний и верхний уровень рассматриваемой системы. Программа имеет удобный вид, с множеством настроек, которые позволяют получить данные о любых изменениях производимых в логике нижнего или верхнего уровня.

Аудит нижнего уровня представлен в виде таблицы, в которой указан время, источник, ресурс, имя и сообщение изменение в котором описывается само изменение. В настройках можно задать параметры поиска из баз данных, так при знании, что нужно искать, можно легко найти требуемое сообщение. Данный отчет можно сохранить в различных форматах, из распространенных – PDF, DOC, XLS. Пример отчета приведен на рис. 4, он иллюстрирует реальную проблему, произошедшую 2 октября 2012 года на ДП-3, о которой писалось выше.

Occurred Time	Source	Location	Resource	Username	Message
02.10.2012 12:17:19	RSLogix 5000	RS-01	PKZ3	RS-01\admin	Modified Rung [50] in Routine ['OTHERIMNEMO'] New Neutral Text: [[XIC(PP_5P), XIC(PP_3RR),XIC(PP_3RK),XIC(PP_3KR),XIC(PP_3SM)] [OTE(S1_9VDW),OTE(SB_89VDW)];] Old Neutral Text: [XIC(PP_5P), [XIC(PP_3RR) XIC(PP_3RK),XIC(PP_3KR),XIC(PP_3SM)] [OTE(S1_9VDW),OTE(SB_89VDW)];]
02.10.2012 12:17:24	RSLogix 5000	RS-01	PKZ3	RS-01\admin	Modified Rung [50] in Routine ['OTHERIMNEMO'] New Neutral Text: [[XIC(PP_5P), [XIC(PP_3RR) XIC(PP_3RK),XIC(PP_3KR),XIC(PP_3SM)] [OTE(S1_9VDW),OTE(SB_89VDW)];] Old Neutral Text: [[XIC(PP_5P), [XIC(PP_3RR) XIC(PP_3RK),XIC(PP_3KR),XIC(PP_3SM)] [OTE(S1_9VDW),OTE(SB_89VDW)];]

Рисунок 4. – Пример отчета изменений в нижней логике

С помощью аудита верхнего уровня можно установить кто и когда, каким образом делал изменения в системе верхнего уровня, начиная от подключений к серверу визуализации заканчивая изменениями вносимые в SCADA. Отчет представляет собой таблицу с последними 500 изменениями.

Данная программа появилась в ноябре 2011 года и легко встроилась в существующую систему. Уже с первых дней работы программы выявились несоответствия между журналом регистрации изменений и фактически выполненными изменениями. В период с ноября по декабрь 2011 года, с помощью AssetCentre удалось выявить свыше 50 несоответствий в записях журнала регистрации изменений, по сравнению с 2010 годом. В проставлении двух месяцев количество изменений в системе сократилось в 2 раза, из чего можно сделать вывод – многие, ранее выполненные изменения не требовались, или были не настолько критичными чтобы производить изменения в системе, и могли привести к непредсказуемым последствиям. Ими могли оказаться блокировки на критически важные сигналы, такие как давление доменного газа на БВН, уровень засыпи, давление в печи и т.п. Программный комплекс AssetCentre выполняет функцию защиты системы нижнего и верхнего уровней, тем самым, исключая человеческий фактор. Для наглядности приведем официальную статистику задокументированных изменений в месяц, произведенных дежурным персоналом на протяжении последних трех лет, взятую в отделе АСУ ТП ПАО «ЕВРАЗ - ДМЗ им. Петровского» приведенную на рис. 5.

Как видно, количество зафиксированных вмешательств в систему возросло более чем в 3 раза, по сравнению с аналогичными периодами за предыдущие годы. Каждая конкретная ситуация фиксируется в автоматическом режиме, и подробно разбирается на встречно-сменном собрании. Внедрение системы FT AssetCentre позволило значительно повысить качество выполняемой работы, уровень безопасности, а также свести к минимуму вмешательство в работу системы без необходимости, о чём свидетельствует спад уровня зафиксированных вмешательств к концу текущего года.



Рисунок 5. – Усредненное количество изменений в системах АСУ в месяц, зафиксированных в дежурном журнале

Используя программное решение AssetCentre, мы частично уменьшим человеческий фактор, контролируя вмешательство специалистов, которые непосредственно работают с нижним или верхним уровнем и имеют возможность вносить изменения в логику системы управления, зафиксировав выполненные ими изменения. Если обратить внимание на рис. 1, мы увидим что кроме верхнего (вывод информации, сбор в базы данных) и нижнего (контролеры, их программирование) есть еще другие системы, в которых возможно внести изменения. Для специалиста никакого труда не представляет подпереть датчик, реле или замкнуть контакт физически. При этом в данной программе при составлении отчета никакой информации предоставлено не будет.

При использовании AssetCentre мы увидим только изменения сделанные специалистом который будет вносить изменения в логику, или давать какие ни будь команды из верхнего уровня, то есть таким образом мы частично уменьшаем человеческий фактор в лице специалистов которые работают непосредственно с нижнимили верхним уровнем. При этом никаким образом нельзя получить данные о том что будет происходить непосредственно на механизме которым управляем.

Выводы

Оптимально выбранная система контроля должна обеспечивать нас достаточной информацией по интересующим вопросам, начиная от объекта управления заканчивая нижним уровнем. Система должна быть достаточно сложной и гибкой, чтобы работать с различными типами данных. АСУ часто дополняется новыми функциональными блоками, новыми

подсистемами. Совершенный вариант системы контроля должен также уметь обучаться нововведениям. Поэтому, на наш взгляд, система контроля должна быть построена с использованием нейронных сетей. Это обеспечит достаточную гибкость, возможность работы с различными типами данных (дискретные и аналоговые) и обучаемость.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сбор данных в системах контроля и управления. Практическое руководство. (Парк Дж., Маккей С., серия "Безопасность и системы промышленной автоматизации. Опыт практического применения").
2. Нестеров А.Л. - Проектирование АСУТП. Методическое пособие. Книга 1 – 2006г.
3. Нестеров А.Л. - Проектирование АСУТП. Методическое пособие. Книга 2 – 2009г.
4. Федоров Ю.Н. – Справочник инженера по АСУТП: проектирование и разработка. Инфра-Инженерия., Москва 2008.
5. Обзор информационной безопасности АСУ ТП зарубежных государств. Гарбук Сергей Владимирович, Комаров Андрей Андреевич, Салов Евгений Игоревич (Режим доступа: <http://www.securitylab.ru/analytics/398184.php>).
6. Безопасность АСУ ТП и контроль привилегированных пользователей (Режим доступа: <http://www.anti-malware.ru/node/11899>).
7. Практическая демонстрация типовых атак и 0-day уязвимостей в SCADA и PLC-контроллера. Волобуев П., Миноженко А., Поляков А., DigitalSecurity 2011г.
8. 6 шагов к информационной безопасности АСУ ТП. Ли Ницель (Режим доступа: <http://ua.automation.com/content/6-shagov-k-informacionnoj-bezopasnosti-asu-tp>).
9. Безопасность промышленных систем в цифрах v2.1. Г. Грицай, А. Тиморин, Ю. Гольцев, Р. Ильин, С. Гордейчик. Москва, 2012г.

УДК669.015.4:669.018.295.2

Л.В. Камкіна, О.Г. Безшкurenко,
Ю.І. Сокур, А.А. Надточий, В.С. Манідін

**ВПЛИВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ЧИННИКІВ НА УТВОРЕННЯ
НЕМЕТАЛЕВИХ ВКЛЮЧЕНЬ ВУГЛЕЦЕВОЇ СТАЛІ ТА
ТЕХНОЛОГІЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ПО ЗНИЖЕННЮ ЇХ КІЛЬКОСТІ**

*Запропоновано ряд заходів для зменшення розмірів і кількості неметалевих включень в кордовій сталі. Рекомендовано: магнезитова футеровка промковша і стальковша, захист від вторинного окислення металу, вид засипки у промковші.
Ключеві слова: технологія, неметалеві включення, кількість і вид, рекомендації.*

*Для уменьшения размеров и количества неметаллических включений в кордовой стали рекомендуется ряд мероприятий: магнезитовая футеровка промковша и стальковша, защита от вторичного окисления металла, вид засыпки в промковше.
Ключевые слова: технология, неметаллические включения, количество и вид, рекомендации.*

*To reduce the size and number of non-metallic inclusions in steel cord recommended a number of measures: mahnezytovaya tundish lining and stalkovsha protection secondary oxidation of the metal, type of backfill in the tundish.
Keywords: technology, non-metallic inclusions, the number and species, recommendations.*

Конкурентоспроможність сталі обумовлюється стабільно високими експлуатаційними характеристиками. Чистота сталі стала технологічним параметром - фізичні і механічні властивості кінцевого сталевого продукту не повинні погіршуватися в результаті утворення небажаних неметалевих включень [1]. Найбільш істотно від кількості і морфології неметалевих включень залежить якість і механічні властивості металу, що піддається холодній деформації, яким є кордова, канатна сталі, листова сталь глибокої витяжки та ін. Неметалеві включення, що утворюються в результаті розкислення, можуть знижувати технологічні показники сталі. Це відноситься для сталі як у рідкому (разливаємість металу), так і в твердому (деформованість при волочінні, обривність і т.інш.) стані і, в кінцевому підсумку, впливати на ефективність процесу виробництва сталі, яким є вихід придатного [2-5].

Єдиного ідеального методу оцінки чистоти сталі не існує. Одні способи краще підходять для моніторингу якості, інші використовують в дослідницьких цілях. Тому, для більш точних оцінок вмісту неметалевих включень зазвичай застосовують кілька різних способів. Наприклад, використовують вимір загального вмісту кисню і електроннопроменеву плавку для визначення кількості дрібних включень і удосконалений спосіб електроннопроменевої плавки і електролітичне виділення для визначення великих включень. Фірма Usinor використовує визначення загального кисню, а також методи часткового термічного розкладання, оптичної

емісійної спектроскопії, скануючої електронної мікроскопії для малих включень і методи електролітичного виділення і Маннесман для великих включень [6, 7]. Аналіз вимог виробників металокорду до якості по неметалевим включень, виконаним авторами [8] РУП БМЗ показує, що кожна фірма розробляє їх самостійно в залежності від умов виробництва і свого досвіду.

Визначення оптимальних параметрів рафінування сталі на агрегаті ківш-піч і роботи комплексу МНЛЗ в умовах конкретних підприємств є украй необхідною. Присутність неметалевих включень в сталі і, як наслідок, відкладення цих включень є причинами неминучого затягування занурюваних склянок. Навіть чиста сталь містить деяку кількість неметалічних включень, які приходять з реакцій в розплаві в якості продуктів розкислювання і вторинного окислення, а також ззовні подібно до продуктів ерозії вогнетривів або з шлаку. Значна кількість включень є присутньою в сталі і потім випечної обробки. У 325 тоннах сталі, що розкислює алюмінієм, із загальним вмістом кисню 15ppm міститься приблизно від 3 до 4 літрів щільного оксиду алюмінію, якого більш ніж достатньо для затягування розливної склянки в короткий час.

При безперервному розливанні затягування склянки одна з істотних проблем, якою на підприємстві необхідно управляти. При розливанні сталі що розкислює алюмінієм і, особливо, титан-содержащей особонизкоуглеродистой, частки Al_2O_3 - продукти розкислювання і вторинного окислення, які мають тенденцію до коагуляції і налипання на поверхню вогнетривких стінок, формуючи шар відкладень. Ці відкладення звужують переріз металопроводящего тракту в дозуючих системах, через які пропускається сталь і потік рідкої сталі обмежується. Це відноситься як до склянки проміжного ковша, так і занурюваній склянці і порушує режим протікання розливання.

Затягування склянок ускладнює розливання сталі. Шар відкладень впливає на характер потоку металу через дозуючу систему, формує несиметричний потік в кристалізаторі, що створює додаткові виробничі проблеми і проблеми управління якістю. Великі шматки включень можуть відокремитися від агломерованого відкладення і потрапити в потік сталі в кристалізаторі. Потім вони спливають до меніска, заплутуючись в затверділій кірочці сляба, формуючи дефекти в готовому металі.

Єдиного ідеального методу оцінки чистоти сталі не існує. Одні способи краще підходять для моніторингу якості, інші використовують в дослідницьких цілях. Тому, для точніших оцінок змісту неметалічних включень зазвичай застосовують декілька різних способів. Наприклад, NSC використовує вимір загального вмісту кисню і електроннопроменевою плавку для визначення кількості дрібних включень і вдосконалений спосіб електроннопроменевої плавки і електролітичне виділення для визначення великих включень. Фірма Usinor використовує визначення загального кисню, а також методи часткового термічного розкладання, оптичній емісійній спектроскопії, скануючій електронній мікроскопії для малих включень і методи електролітичного виділення і Маннесману для великих включень [7].

Аналіз вимог виробників металокорда до якості по неметалічних включення, виконаним авторами [8] РУП БМЗ показує, що кожна фірма розробляє їх самостійно залежно від умов виробництва і свого досвіду.

Нами використана методика оцінки неметалевих включень, яка розроблена автором [9], одним з критеріїв оцінки є F - доля площі, зайнятий НВ. Доцільно зіставити цей критерій із загальноприйнятою оцінкою по балах (таблиця 1 і рівняння 1).

Таблиця 1

Зіставлення максимального балу НВ до лі площі, зайнятий НВ

Доля площі, зайнятий НВ (%) при максимальному балі НВ :					
Максимальний бал	1	2	3	4	5
F , %	0,14	0,23	0,26	0,49	1,31

$$F = 0,26B - 0,29; \quad r = 0,86; \quad (1)$$

де B - бал НВ по ГОСТ 1778; r - коефіцієнт детерміації. Таким чином, встановлений чіткий зв'язок між F і балом НВ.

У таблиці 2 приведені дані по зміні НВ по ходу виробництва сталі, проведених з відбором проб на усіх етапах виробництва сталі.

Таблиця 2

Зміна F по ходу виробництва сталі

Місце і час відбору проб	КПК-1	КПК-2	КПК-3	ПрК-1	ПрК-2	ПрК-3	ГП
F , %	1,66	0,46	0,53	0,43	0,42	0,31	0,40

Максимальна забрудненість сталі НВ - на початку обробки металу на КПК. Вже в середині обробки в результаті наведення білого шлаку і продування аргонном забрудненість сталі НВ знижується в 3,6 разу, залишаючись при подальшій обробці приблизно на одному і тому ж рівні. вплив різних технологічних чинників на характеристики НВ приведені в таблицях 3-6.

Таблиця 3

**Вплив технологічних параметрів на характеристики НВ в катанці
(у весь масив плавки)**

Характеристики НВ, усереднені значення (за включенням h_{max} і d_{max})	Параметри технології									
	Витрата SiCa на плавку, м				Футерування ПрК		Засипка		Захист струмені з сталювша	
	≤ 200	201-300	301-500	> 500	O_x	K_{xx}	K_{erxxx}	Z_{xxx}	+	-
F , %	0,44	0,38	0,26	0,30	0,28	0,41	0,33	0,28	0,27	0,36
l , мкм	5454	5134	4448	4052	3871	6490	5053	4138	3140	5213
пгл., %	11,4	31,5	18,45	25,4	21	13	15,4	8,8	48,0	14,0
h_{cp} , мкм	2,03	2,28	1,71	1,94	1,9	2,38	2,1	1,32	1,18	2,1
h_{max} , мкм	7,8	7,7	5,1	6,8	6,8	8,04	7,5	6,0	5,4	7,6
d_{cp} , мкм	7,25	5,6	3,83	7,4	4,95	8,65	4,22	4,3	7,2	6,3
d_{max} , мкм	12,1	8	7,3	9,1	6,93	14,4	9,6	4,3	7,2	8,8

xO - основна, xxK - кисла, $xxxKer$ - керамзит, $xxxxZ$ - зола рисового лушпиння.

Таблиця 4

Характеристики НВ в катанці при використанні промковшей з кислим і основним футеруванням

Футерування	N	n	F	l	n _{гл}	h _{ср}	h _{max}	d _{ср}	d _{max}
Кисла	16	65	0,5	7662	12,1	1,49	16	12	30
Основна	23	43	0,25	3167	22,1	1,95	20	7,3	20

Таблиця 5

Характеристики НВ в катанці, отриманій з використанням якості засипки в промковші Slax2005(S) із олії рисового лушпиння (З)

Засипка	N	n	F	l	n _{гл}	h _{ср}	h _{max}	d _{ср}	d _{max}
S	10	44	0,553	6020	4,6	2,32	8	13,75	24
З	8	43	0,382	5470	9,9	1,86	7	11,15	18,75

Таблиця 6

Характеристики НВ в катанці, отриманій без захисту струменя (-) і із захистом струменя (+) з ПрКвДо (усереднені значення за винятком h_{max} і d_{max})

Захист струмені	N	n	F, %	l, мкм	n _{гл} , %	h _{ср} мкм	h _{max} мкм	d _{ср} мкм	d _{max} мкм
-	6	54	0,28	3019	23,1	2,43	7,6	4,84	10
+	6	56	0,12	2058	24,4	1,76	4,4	6,68	10

З літературних джерел відомо, що при введенні Са первинні продукти розкислювання легко спікаються, внаслідок низької температури їх плавлення, а великі НВ легко спливають. Зі збільшенням змісту Са кількість рядкових НВ зменшується. При Са/S > 0,3 вони зникають і замість них утворюються глобулі-оксисульфиди, що складаються з оксидного ядра і сульфідної оболонки. Форма таких НВ не змінюється навіть при гарячій обробці, що пояснюється високою температурою плавлення - 1600°C [10]. НВ алюмінатів не утворюються при Са/Al > 0,13 [10]. Відомо, що Са зв'язує поверхнево-активні елементи - кисень і сірку, що виділяються по межах зерен, завдяки чому зменшується схильність сталі до розтріскування, а збільшення вмісту Са супроводжується збільшенням відносного подовження і звуження і ударної в'язкості [11]. Гранична розчинність Са в залізі визначається вмістом вуглецю: при вмісті вуглецю C = 0,03% - вміст кальцію Са=0,03%; при C=0,8% - Са=0,05%.

Звичайна витрата SiCa на плавку складає 130-220 м (у вигляді порошкового дроту). Виходячи з викладеного вище, було запропоновано збільшити витрату SiCa до 600 м, проте на більшості плавок, проведених при такій витраті, спостерігалось затягування склянок в ПрК, що взагалі суперечить сталій думці, і на наш погляд пояснюється тим, що введення SiCa приводить до зменшення вмісту і активності кисню, тобто до підвищення t_{пл} НВ. Обдування струменя металу киснем при цьому призводить до зниження t_{пл} НВ і їх змиванню. Тому на подальших плавках витрата SiCa була обмежена величиною 400-500 м.

Вміст Са в SiCa складає 57 г/пог.м (30%). Міра засвоєння Са відразу ж після його введення на ПК - 24-30%, проте в ПрК вміст Са знижується в 2 рази в результаті його взаємодії з киснем і сіркою. По ходу розливання вміст Са в металі в ПрК практично не міняється.

Вміст Са до введення SiCa знаходиться в межах $(1...5) \cdot 10^{-4}\%$, вміст Са в ПрК при витраті SiCa 180-220 м - $(5...12) \cdot 10^{-4}\%$, при витраті підвищеної кількості SiCa - до $(25...40) \cdot 10^{-4}\%$, при цьому відношення Са/S наближається до 0,3.

Дію Са можна проілюструвати на прикладі плавки №1 - кількість НВ в металі на КПК до введення і після введення SiCa і в ПрК в середині розливання відповідно до 19, 112, 140, площа F - відповідно до 0,63; 0,25; 0,26%; $d_{\text{сер}}$ - відповідно до 25,6; 6,8; 8,2 мкм - тобто введення SiCa призводить до істотного подрібнення НВ і зменшенню площі НВ.

Обробка даних таблиці 3 (з урахуванням кількості проглянутих зразків N) дозволила отримати наступні регресійні рівняння:

$$F = 0,51 - 5,1 \cdot 10^{-4}L; \quad r = - 0,86 \quad (2)$$

$$l = 6070 - 3,98L; \quad r = - 0,99 \quad (3)$$

$$n_{\text{гд}} = 9,09 + 3,9 \cdot 10^{-2}L; \quad r = - 0,39 \quad (4)$$

$$h_{\text{ср}} = 2,17 - 7,83 \cdot 10^{-4}L; \quad r = - 0,59 \quad (5)$$

$$d_{\text{ср}} = 7,23 - 4,3 \cdot 10^{-3}L; \quad r = - 0,43 \quad (6)$$

$$h_{\text{max}} = 8,57 - 6 \cdot 10^{-3}L; \quad r = - 0,67 \quad (7)$$

$$d_{\text{max}} = 8,57 - 6 \cdot 10^{-3}L; \quad r = - 0,71 \quad (8)$$

де L - довжина дроту SiCa, м; r - коефіцієнт кореляції.

Усі отримані рівняння значущі ($r_{\text{кр}} = 0,22$ при N = 82). Таким чином, виразно видимим є позитивний вплив SiCa на зменшення забрудненості сталі НВ, на зменшення розмірів НВ і на збільшення долі глобулярних включень.

При кислому футеруванні ковшів в сталі збільшується вміст кисню. За літературними даними [12] у металі у поверхні ковша з кислим футеруванням a_0 дорівнює 40 ppm, в середині ковша 9-16ppm. У ковші з основним футеруванням - до 5ppm незалежно від місця відбору проб. У таблиці 4 зіставлені характеристики НВ по серіях плавок з кислим і основним футеруванням. За технологією у цих серіях тільки одна відмінність - перша виплавлена з використанням кислого футерування ПрК, друга, - з основним. За усіма показниками метал, вироблений з використанням основного футерування ПрК набагато чистіший по НВ порівняно з кислим футеруванням. Аналогічні результати отримані при обробці усього масиву плавок – таблиця 3.

В якості засипок в ході даного дослідження застосовували керамзит (Кер), золу рисового лушпиння (З) і Slax 2005 (S). Як впливає з таблиці 5 (обробка усього масиву плавок) при використанні засипки З метал чистіший по НВ, ніж при використанні засипки Кер (очевидно, це пов'язано з тим, що засипка Кер містить оксиди заліза, а засипка З не містить). У таблиці 5 зіставлені характеристики НВ на плавках з

використанням в якості засипок золи рисового лушпиння (З) і Slax 2005 (S). В даному випадку зіставлялися плавки, проведені за однаковою технологією (витрата SiCa - 400м, бору - 40м, основне футерування ПрК, без захисту струменя з ПрК із захистом із СК). З таблиці 5 витікає, що переважність на стороні засипки З за усіма критеріями оцінки НВ. Слід зазначити, що погіршення характеристики НВ при використанні засипки S сталося в результаті того, що на 3-х зразках з 10 F і l мали дуже високі значення 1,233...1,424% і 8840...13720мкм відповідно, що значно перевищують інші. Мабуть, це пов'язано з поганим "розтіканням" засипки S по дзеркалу металу в ПрК, що відзначалося при випробуваннях.

Про позитивний вплив захисту струменя на зменшення НВ свідчать багато джерел. У роботах [11,13], наприклад, встановлено, що якщо кількість НВ при відкритому розливанні прийняти за 100%, то при азотній завісі їх кількість зменшується до 37%, а при розливанні через погрузну склянку і використанні розливної суміші - до 14%. Аналогічні дані отримані в цьому дослідженні (таблиця 6).

Вміст MnO і TiO₂ в шлаку, відібраному з ПрК складає 10 і 0,54%, в шлаку з кристалізатора відповідно до 35 і 1,54%. В таблиці 7 приведений розрахунок кількості шлаку, що утворився при вторинному окисленні металу при розливанні відкритим струменем по балансу Mn і Ti, вміст Mn до МНЛЗ 0,963%, в готовому прокаті 0,944%, Ti - відповідно до 0,0032 і 0,0017%.

Таблиця 7

Розрахунок кількості шлаку, що утворився при вторинному окисленні металу при розливанні відкритим струменем

Елемент	Mn	Ti	V
Зміст елементу до МНЛЗ, %	0,963	0,00320	0,00060
Зміст елементу в готовому прокаті, %	0,944	0,00170	0,00110
Вицвіло, %	0,019	0,0015	0,0005
кг/пл	22,8	1,8	0,6
Утворилося оксиду, кг/пл	29,43	3	0,98
Зміст оксиду в шлаку з кристалізатора, %	35	1,54	-
Маса шлаку, що утворився, кг/пл	84,09	194,8	-
% до маси сталі	0,07	0,16	-

Розрахунки показують, що кількість шлаку складає 84 кг - 0,07% мас. по балансу Mn і 195 кг - 0,16% мас. по балансу Ti. Розбіжність, швидше за все, пов'язана з неточністю визначення вмісту Ti при низьких його концентраціях, проте, абсолютно ясно, що вторинне окислення вносить істотний вклад у збільшення НВ.

При розливанні відкритим струменем із СК відбувається збільшення НВ за рахунок вторинного окислення, з іншого боку - спливання НВ, причому ці процеси урівноважують один одного. При розливанні відкритим струменем з ПрК спливання НВ виключено. Питома поверхня струменя із СК складає 0,08см²/г, з ПрК 0,357см²/г, тобто в 4,5 разів більше. Проте, потрібний захист струменів як із СК, так з ПрК. З таблиць 5 та 7 витікає,

що захист струменя із СК покращує усі характеристики НВ – площа F , наприклад, зменшується в 1,33 рази. Ще більше різючі результати отримані при захисті струменя з ПрК – площа F зменшується в 2,33 разу (таблиця 6 отримана зіставленням на 3-х плавках характеристик НВ металу 2-х струмків, на одному з яких здійснювався захист струменя, на іншому захисту не було).

Зіставлення впливу різних технологічних чинників на зміну характеристик НВ приведені в таблицю 8. Максимальні значення характеристик НВ підкреслені (для $n_{\text{гд}}$ - мінімальне). Показано, що жоден з технологічних чинників не може бути абсолютним лідером за всіма характеристиками НВ (хоча при захисті струменя з ПрК отримано максимальне зниження F - в 2,33 рази). Тому усі заходи мають бути використані в комплексі. На одній з плавок були поєднані усі запропоновані заходи - підвищена витрата SiCa, хоча і не максимально можлива, засипка - зола рисового лущиння, основне футерування ПрК, захист струменя із СК і ПрК, що дозволило отримати чисту по НВ сталь. За допомогою мікрорентгеноспектрального аналізу на установці МС-46 "КАМЕКА" встановлено, що основним типом НВ в дослідних сталях, є багатокомпонентні одно- і двофазні силікати. Разом з ними спостерігаються сульфіди типу (Mn, Fe) S з ГЦК-гратками, "металеві" позиції, в якій зайняті переважно атомами марганцю.

Визначено, що НВ, в т.ч. великі, такі, що утворюються в сталях при виробництві за звичайною технологією сталеплавильного переділу, мають, як правило, підвищений вміст марганцю ("марганцеві" силікати). Такі НВ при високих температурах мають високу пластичність, порівнянну з пластичністю матриці сталі і при гарячому плющенні легко трансформуються у витягнуті уподовж осі плющення утворення, що мають при мікроаналізі вигляд суцільних або переривчастих смуг і стрічок. У плавках металу, зроблених за дослідною технологією з модифікуванням кальцієм, НВ зберігають округлу форму і в готовому прокаті на подовжніх зразках і характеризуються підвищеним вмістом кальцію, тобто відносяться до типу "кальцієвих" силікатів. Сульфіди в дослідній сталі, як і "марганцеві" силікати, формуються у витягнуті уподовж осі прокату утворення тільки при гарячому плющенні. У пробах, відібраних по усьому переділу з рідкої сталі і в НЛЗ НВ незалежно від складу мали сферичну форму.

Проведені дослідження НВ по ходу технологічного циклу показали, що раціональний вибір технологічних параметрів (захист струменя, наявність і певний тип засипки, склад використовуваного футерування, режим фінішного розкислювання) дозволяє забезпечити сприятливу морфологію і понизити зміст НВ в кордовому металі.

Таблиця 8

Зіставлення впливу різних технологічних чинників на зміну характеристик HB

Технологічні чинники	Зміна характеристик HB						
	F	l	n _{гп}	h _{сер}	h _{max}	d _{сер}	d _{max}
Відношення характеристик HB в сталі, зроблений з використанням кислого футерування PrK до характеристик HB в PrK з основним футеруванням.	1,46	<u>1,68</u>	0,62	1,25	1,18	<u>1,75</u>	<u>2,1</u>
	2,0	2,4	0,55	0,76	0,8	1,64	1,5
Відношення характеристик HB в сталі, зроблений із засипкою Кер до характеристик HB в сталі, зроблений із засипкою З.	1,17	1,22	1,18	<u>1,59</u>	1,25	1	<u>2,23</u>
Відношення характеристик HB в сталі, зроблений із засипкою S до характеристик HB в сталі, зроблений із засипкою З.	1,45	1,10	0,46	1,25	1,14	1,23	1,28
Відношення характеристик HB в сталі, зроблений без захисту струменя із сталью до характеристик HB в сталі, зроблений із захистом струменя.	1,33	<u>1,66</u>	<u>0,29</u>	0,56	1,41	0,88	1,0
Відношення характеристик HB в сталі, зроблений без захисту струменя з PrK до характеристик HB в сталі, зроблений із захистом струменя.	<u>2,33</u>	<u>1,47</u>	<u>0,95</u>	1,38	<u>1,73</u>	0,72	1
Відношення характеристик HB в сталі, при витраті SiCa 200 м, до характеристик HB в сталі при витраті SiCa 400 м	1,33	1,18	0,68	1,08	1,16	1,19	1,26

Висновки

1. На підставі аналізу вимог стандартів провідних виробників до катанки для виготовлення металокарда обґрунтований комплекс заходів, що дозволяє забезпечити чистоту вуглецевої сталі за змістом домішок і НВ. З метою забезпечення якості сталі на рівні світових стандартів виконаний ряд удосконалень базової конструкції установки ковш-піч (проведена реконструкція ковша-печі, можливість вдування, що забезпечує, в ківш порошкоподібних матеріалів) і освоєння на УКП нових технологічних прийомів, що дозволили інтенсифікувати процес шлакоутворення, підвищити десульфуруючу здатність шлаків і понизити вміст азоту в металі.

2. НВ в готовому прокаті, що впливають на якість сталі, представлені як включеннями, що перейшли з рідкого металу (в основному), так і твердими НВ, що утворилися при кристалізації. Експериментально встановлено, що в процесі кристалізації відбувається утворення твердих НВ SiO_2 (содержание SiO_2 збільшується з нуля до 17-21%), CaO (з 32 до 45%), можливо також утворення твердих НВ глинозему. Міра деформації НВ при плющенні в 2,6 разів нижче, ніж міра деформації металу.

3. Експериментально встановлено, що до зменшення розмірів і кількості НВ в кордовій сталі приводить: збільшення витрати кальційвмісного дроту; заміна глиноземного футерування стальногоша і промковша на магнезитову; заміна керамзитової засипки в промковше засипкою на основі золи рисового лушпиння; захист струменів металу від вторинного окислення із стальногоша і промковша, причому остання ефективніша.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Hassall G. J., Bain K. G., Young R.W., Millman M. S. Studies in development of clean steels. Part 1 Modeling aspects//Ironmaking & Steelmaking.- 1998.-v. 25.-№ 4.- P. 273-278.
2. Губенко С.И. Трансформация неметаллических включений в стали.-М.: Металлургия, 1991.-225с.
3. Явойский В.И., Неметаллические включения и свойства стали./Явойский В.И., Рубенчик Ю.И., Оленко А.П.//М.: Металлургия, 1980. - 176 с.
4. Явойский В.И. Включения и газы в стали. /Явойский В.И., Близнюков С.А., Вишкарев А.Ф.// -М.: Металлургия, 1979 г., - 272 с.
5. Ершов Г.С. Микронеоднородность металлов и сплавов. /Ершов Г.С., Позняк Л.А. //М.: Металлургия. 1985. - С. 214.
6. Эльсмер Э. Шлаковые и оксидные включения при непрерывном литье стали /Э. Эльсмер, КХ. Кнапп, Д.Амелингдр. //Черные металлы.-1977 -№ 23.-С. 17-22.
7. Burty M. Methodology of Steel Cleanliness Assessment/Burty M., Louis C., Dunand P.// La Revue de Metallurgie – CIT.-Vol. 97 (6).- 2000.-P.775-782.
8. В.В. Эндерс Совершенствование режима раскисления и внепечной обработки кордовой стали на основе информации об окисленности металла /В.В.Эндерс, М.П.Гуляев, Д.С. Якшукидр. /Литье и металлургия.-2002.-№4.-С.143-147.
9. Губенко С.И. Неметаллические включения в стали./Губенко С.И., Парусов В.В., Деревянченко И.В.//Д.: Арт-пресс, 2005.-536 с.

10. Обработка жидкой стали кальцием (обзор)//Черныеметаллы.-1980.-№1.-С. 19-30.
11. ЯкобиХ. Степень чистоты сталей, подвергнутых глубокой десульфурации кальцием/ЯкобиХ., КлемР., ВюнненбергК.//Черныеметаллы.-1987.-№ 17.-С. 9-17.
12. БанненбергН. Взаимодействие между огнеупорным материалом и сталью и его влияние на степень чистоты стали//Черныеметаллы.-1996.-№ 3.-С. 26-34.
13. ХоБ. Повышение степени чистоты стали при непрерывной разливке/ХоБ., ЯкобиХ., ВимерХ.А. и др.//Черныеметаллы.-1989. - № 12. - С. 22-29.

УДК 662.71-74

А.Г. Старовойт , М.С. Чемеринский, П.Н. Рафальский, А.А. Шульга

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ОБРАБОТКИ УГЛЕЙ РАЗНОЙ СТАДИИ МЕТАМОРФИЗМА НА ИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Анотація. У статті розглянуто вплив електромагнітної енергії на вугілля різній стадії метаморфізму. Проведено випробування по електромагнітній обробці вугілля різній стадії метаморфізму з подальшим дослідженням зміни їх технологічних властивостей. Зроблено висновки про вплив електромагнітної обробки на їх характеристики.

Ключові слова: метаморфізм вугілля, електромагнітна енергія, технологічні властивості.

Анотация. В статье рассмотрено влияние электромагнитной энергии на угли разной стадии метаморфизма. Проведены испытания по электромагнитной обработке углей разной стадии метаморфизма с дальнейшим исследованием изменения их технологических свойств. Сделаны выводы о влиянии электромагнитной обработки на их характеристики.

Ключевые слова: метаморфизм углей, электромагнитная энергия, технологические свойства

Annotation. In this paper we examine the effect of electromagnetic energy at a different stage of coal metamorphism. The tests for electromagnetic treatment of coals of different metamorphic stages with further study changes in their technological properties. The conclusions about the impact of electromagnetic treatment on their characteristics.

Keywords: coal metamorphism, electromagnetic energy, technological properties.

Известно [1], что в промышленности тепловое воздействие на материалы органического и минерального происхождения при заданных температуре и времени требует равномерности и управляемости нагрева. Любая попытка интенсифицировать данный технологический процесс, с применением обычных источников нагрева, не представляется возможным из-за ограниченной теплопроводности материалов. В результате, достичь желаемого равномерного нагрева не удастся, и на практике получают перегрев наружных слоев с одновременным недогревом внутренних.

В связи с этим в различных отраслях промышленности внедряются современные разработки науки и техники. К таким можно отнести технологии основанные на использовании электромагнитной энергии. Микроволновый нагрев позволяет реализовать объемный (внутренний) нагрев за счет проникновения электромагнитной энергии вглубь нагреваемого диэлектрического материала. Поглощение диэлектриком электромагнитной волны сопровождается явлением поляризации, что в свою очередь приводит к образованию теплоты в объеме нагреваемого объекта.

В работах [2,3] описан способ термической подготовки малометаморфизированных углей с использованием в качестве теплоносителя электромагнитной энергии. Механизм воздействия электромагнитного поля высокой частоты на угольное вещество, сложный физико-химический процесс, который способствует целому комплексу реакций с разрывом межмолекулярных связей и формированием новых, с использованием образовавшегося в ходе деструкции «свободного» водорода (т.н. частичная гидрогенизация). Следовательно в результате такой (электромагнитной) обработки происходит ряд глубоких внутримолекулярных превращений в органической массе угля, приводящих к изменению его термопластических свойств.

Согласно [4], термической подготовке целесообразно подвергать только малометаморфизированные, газовые угли. Однако, учитывая все качественные внутримолекулярные изменения, происходящие при электромагнитной обработке малометаморфизированных углей, интересен эффект, которого можно достичь при обработке углей средней и высокой стадии метаморфизма.

Необходимо отметить, что каменный уголь относится к разряду диэлектрических материалов [5]. Однако с увеличением содержания углерода в элементном составе, уголь может наряду со свойствами диэлектрика, частично обладать и свойствами проводника (полупроводника), т.е. иметь некоторую проводимость [6]. В связи с этим объемный нагрев угля в электромагнитном поле обуславливается выделением теплоты вследствие поляризации и от возникающего тока проводимости. Попросту говоря, переход углей от низшей стадии метаморфизма к высшей, способствует проявлению свойств полупроводника и соответственно повышению скорости нагрева.

Таким образом, в данной работе исследовали влияние электромагнитной обработки углей разной стадии метаморфизма на их технологические свойства.

Для исследования были взяты опытные образцы угольных концентратов разной степени метаморфизма с крупностью 6-3 мм, которые обрабатывались в специальной микроволновой печи с мощностью электромагнитного поля 750 Вт в течении 240 с. Обработанные пробы угольных концентратов охлаждали до температуры окружающей среды без доступа воздуха (пример обработки приведен в [7]). Подготовленные пробы исследовались на технические, пластометрические и петрографические показатели, а также прочностные свойства. Полученные данные стандартных и обработанных проб угольных концентратов приведены в табл.1.

Таблиця 1

Опытные данные

№ п/п	Марка угля	Примечание	ВИМС, %	Технический анализ, %			Пласто- метрические показатели, мм		R ₀ , %	ΣСК, %	Петрографический анализ					
				A ^d	V ^{daf}	S ^d _t	X	Y			Марочный состав, %					
											ДГ	Г	Ж	К	ОС	Т
1	К	Шахта Северная	50,8	11,1	24,2	0,55	20	15	1,16	65,6	-	2,0	49,0	49,0	-	-
2	К	обработка	19,1	9,4	21,7	0,49	37	11	1,21	56,3	-	-	42,0	56,0	2,0	-
3	ОС	Компания Покахонтас	62,6	7,1	17,9	0,77	5	10	1,55	79,5	-	-	2,0	5,0	88,0	5,0
4	ОС	обработка	15,3	12,6	17,0	0,65	26	7	1,58	56,4	-	-	4,0	2,0	84,0	10,0
5	ГЖ	Абашевская ЦОФ	45,2	9,1	26,0	0,63	14	17	1,18	85,6	-	60,0	38,0	2,0	-	-
6	ГЖ	обработка	10,7	11,1	24,8	0,59	17	16	1,22	77,4	-	46,0	51,0	3,0	-	-
7	КЖ	Компания Oaku north	54,0	8,8	26,1	0,65	13	17	1,18	86,6	-	-	63,0	37,0	-	-
8	КЖ	обработка	14,0	11,7	25,0	0,58	15	17	1,26	80,3	-	-	27,0	70,0	3,0	-
9	ГЖО	ЦОФ Промугольсервис	39,9	7,0	36,6	0,47	39	8	0,72	79,2	9,0	88,0	3,0	-	-	-
10	ГЖО	обработка	24,8	5,5	37,0	0,40	42	9	0,73	74,9	10,0	86,0	4,0	-	-	-
11	Ж	Компания Велмор	37,5	7,5	32,6	1,06	24	19	1,03	88,0	-	6,0	90,0	1,0	3,0	-
12	Ж	обработка	26,1	6,9	32,8	1,02	32	20	0,99	81,7	-	16,0	84,0	-	-	-
13	ГЖ	Краснолиманская ЦОФ	52,9	8,3	39,8	3,39	50	16	0,85	93,7	-	75,0	19,0	6,0	-	-
14	ГЖ	обработка	29,9	5,0	40,1	3,25	54	16	0,75	88,1	4,0	80,0	16,0	-	-	-
15	КО	Угли Кузбасс	62,5	8,9	19,5	0,34	26	9	1,23	41,0	-	1,0	45,0	43,0	11,0	-
16	КО	обработка	46,0	8,2	19,2	0,28	31	6	1,21	38,5	-	-	49,0	50,0	1,0	-

Проведенные исследования показали, что электромагнитная обработка способствует изменению как технических, так и технологических свойств угля.

В результате разрыва межмолекулярных связей, а так же внутреннего нагрева угольной частицы, начинают выделяться летучие вещества, характерные для первичной стадии газовыделения в процессе коксования. Образование «свободного» водорода, у углей низкой и средней стадии метаморфизма, способствует легкому гидрированию вновь образованных молекулярных осколков. Так выход летучих веществ, у обработанных углей снижается на 0,4 %, при этом происходит снижение сернистости на 0,6 %. При обработке углей высокой стадии метаморфизма сернистость так же снижают, однако выход летучих веществ изменяется в меньшей степени, что обусловлено отличиями в элементном составе углей. По-видимому процессы гидрирования в результате электромагнитной обработки протекают в меньшей мере, либо вообще не происходит.

Что же касается изменения петрографического состава, то можно отметить, что микроволновая обработка углей способствует, в некоторой степени, изменению среднего показателя отражения по витриниту. Данные (R_0 , марочный состав) показывают, что малометаморфизированные угли несколько улучшают свои спекающие и петрографические характеристики (для улучшения свойств в большей мере, возможно, необходим больший период микроволновой выдержки, как в [7]). В ходе микроволновой обработки угля марки “К”, также наблюдаются схожие изменения петрографических характеристик (повышение в марочном составе марки “ОС” на 2 %). Таким образом, можно наблюдать изменение марочного состава в сторону повышения стадии метаморфизма практически во всех исследуемых пробах углей.

Интересно отметить, что в процессе проведения исследований, обработанный в электромагнитном поле уголь заметно снизил свою механическую прочность. Данный факт отражается в приложении меньшего усилия при дроблении. Поэтому все подготовленные пробы исследовались на изменение физико-механических характеристик по методу ВИМС. Полученные данные показали, что в результате электромагнитной обработки угли снижают свою способность создавать сопротивление деформации и разрушению при обработке. Вероятно всего в результате объемного нагрева, во время движения влаги от центра к периферии, образуются капиллярные микротрещины и каналы, которые существенно способствуют снижению прочности.

Выводы. Таким образом, проведенные исследования показали следующее. В процессе микроволновой обработки каменного угля происходит поглощение электромагнитной энергии с преобразованием ее в теплоту в объеме обрабатываемого угля. Образование теплоты связано с поляризацией молекул, радикалов и др. В нашем случае обработке подвергались угли разной стадии метаморфизма. Уплотнение (конденсирование) макроструктуры более метаморфизованных углей способствует улучшению свойств электропроводимости, что в свою очередь повышает скорость передачи тепла внутрь угольного зерна. Поэтому высокометаморфизированные марки углей нагреваются быстрее. Угли же

низкой стадии метаморфизма нагреваются дольше и требуют более длительного периода обработки для проявления положительного эффекта.

Изменение петрографических характеристик углей, прошедших микроволновую обработку, выражено в увеличении доли замеров с большей степенью отражения витринита, ивероятно связано с перераспределением водорода. Воздействие электромагнитной энергии на макромолекулу угля способствует разрыву водородных связей с образованием «свободного» (атомарного) водорода. Его участие в реакциях избирательного гидрирования молекулярных новообразований способствует размягчению угля, образованию жидких продуктов распада, росту толщины пластического слоя [8]. Этот эффект наблюдается у мало- и среднеметаморфизированных углях (ГЖО, Ж). Содержание водорода в таких углях находится в пределах 5,3-6,0% при выходе летучих веществ 29,0-43,0%. Так у данных углей, в некоторых случаях, происходит рост толщины пластического слоя на 12,5%. Угли высокой стадии метаморфизма содержат меньше количество водорода 4,5-5,2% при выходе летучих 18,0-28,8%, что тем самым ухудшает условия гидрирования с одновременным снижением и пластических характеристик.

Таким образом, подвергать электромагнитной обработке угли средней и высокой стадии метаморфизма не целесообразно ввиду снижения их качественных характеристик. Обработка углей низкой стадии метаморфизма способствует улучшению их свойств, а именно: снижению сернистости, повышению термопластических характеристик, снижению физико-механических свойств, повышение степени углефикации. Использование таких углей в составе шихты позволит расширить сырьевую базу коксования, подготовить угольную шихту по схеме ДШ, интенсифицировать процесс производства кокса, способствуя в дальнейшем отразиться на снижении себестоимости кокса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Островский Г.М. и др. Новый справочник химика и технолога. процессы и аппараты химических технологий. Ч.І. - С.-Пб.: АНО НПО «Профессионал», 2004. – 848 с.
2. Старовойт А.Г. Влияние содержания в шихте термически подготовленного в микроволновом поле газового угля на качество кокса / А.Г.Старовойт, Е.И.Малый, М.С.Чемеринский // Кокс и химия. – 2012. – № 12. – С. 8-12.
3. Слободской С.А. О механизме диэлектрической сушки каменных углей / С.А.Слободской, А.И.Крюковский // Производство кокса. Сб. науч. тр. УХИНа. – Вып. 2. – М.: Металлургия. 1973. – С. 47-51.
4. Чемеринский М.С. Влияние подготовки и способа коксования угольной шихты на качество кокса / М.С.Чемеринский // Углекимический журнал. – 2014. – № 5-6. – С 58-62.
5. Ван-Кревелен Д.В., Шуер Ж. Наука об угле. – Г.: Госгортехдат. 1960. – 303 с.
6. Глуханов Н.П. Физические основы высокочастотного нагрева. – М.: Машиностроение. 1965. – 80 с.
7. Старовойт А.Г. Влияние различных способов термической подготовки углей и угольных шихт на качество кокса. Сообщение 1. Экспериментальная часть / А.Г. Старовойт, Е.И. Малый, М.С. Чемеринский // Углекимический журнал. – 2012. – № 1-2. – С 9-14.
8. Грязнов Н.С. Основы теории коксования / Н.С.Грязнов. – М.: Металлургия. 1976. – 312 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Ванюков А.А., Ванюкова Н.Д., Дядин А.А. Влияние процессов низкотемпературного нагрева на процесс восстановления самовосстанавливающихся безобжиговых окатышей (СВО).....	3
Журба А.А. Взаимосвязь фрактальных характеристик металлоструктур и параметров технологии	8
Кирия Р.В., Ларионов Н.Г. Математическая модель сопротивления движению ленты с грузом по роlikоопорам конвейера с лентой глубокой желобчатости	14
Мамедов А.Т., Мамедов Ф.Ф., Поладов Н.Г. Условия прилипаемости слоя формовочной смеси с моделью литейной формы	27
Миронова Т.М. Исследование карбидных превращений с помощью электронной микроскопии	40
Євтушенко Г.Л., Михальов О.І., Кузнецов В.І. Системна модель для багатокритеріального аналізу технологій використання енергетичних ресурсів металургійного виробництва.....	50
Рахманов С.Р., Ольшанский В.П. Динамика стержня оправки прошивного стана с учетом переменности во времени массы механической системы.....	66
Сорокин Е.Л. Изучение возможности использования «красного шлама» в качестве активной добавки	77
Шварцман Л.Я., Троценко Э.А., Баженов Е.В., Додонов В.Н. Процесс водородного восстановления трихлорсилана в многостержневых реакторах получения поликристаллического кремния – новые возможности управления для традиционных технологий	84
Безуб В.Н., Карасевич А.В. Совершенствование систем контроля и безопасности АСУТП металлургического производства	93
Камкіна Л.В., Безшкурєнко О.Г., Сокур Ю.І., Надточий А.А., Манідін В.С. Вплив технологічних чинників на утворення неметалевих включень вуглецевої сталі та технологічні рекомендації по зниженню їх кількості	93
Старовойт А.Г., Чемеринский М.С., Рафальский П.Н., Шульга А.А. Исследование влияния электромагнитной обработки углей разной стадии метаморфизма на их технологические свойства	93

АВТОРЫ ВЫПУСКА

Баженов Евгений Васильевич – к.т.н., технический директор ООО «Солнечные Стандартные Решения».

Безуб Владимир Николаевич – старший преподаватель, Национальная металлургическая академия Украины.

Безикурченко Олексій Георгійович – ассистент, кафедры теории металлургических процессов та загальної хімії, Національна металургійна академія України.

Ванюков Антон Андреевич – аспирант кафедры металлургии чугуна, Национальная металлургическая академия Украины.

Ванюкова Наталия Дмитриевна – профессор, д.т.н., профессор кафедры металлургии чугуна Национальной металлургической академии Украины.

Додонов Владимир Николаевич – генеральный директор ООО «Силидо».

Дядин Александр Алексеевич – аспирант кафедры металлургии чугуна Национальной металлургической академии Украины.

Евтушенко Галина Львовна – аспирант кафедры информационных технологий и систем Национальной металлургической академии Украины.

Журба Анна Алексеевна – к.т.н., доцент кафедры информационных технологий и систем, Национальной металлургической академии Украины.

Камкіна Людмила Володимирівна – д.т.н., проф. кафедры теории металлургических процессов та загальної хімії, декан металургійного факультету, Національна металургійна академія України.

Карасевич Андрей Валерьевич – начальник службы АСУ ТП ЕВРАЗ ДМЗ им. Петровского.

Кирия Руслан Виссарионович – к.т.н., ст. научн. сотрудник, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины.

Кузнецов Владимир Иванович – к.т.н., с.н.с., доцент кафедры информационных технологий и систем Национальной металлургической академии Украины.

Ларионов Николай Григорьевич – младший научный сотрудник Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины.

Мамедов Ариф Тапдыг оглы – д.т.н., профессор, зав. кафедрой литейного и сварочного производства, Азербайджанский технический университет.

Мамедов Фаик Фазиль оглы – докторант кафедры литейного и сварочного производства, Азербайджанский технический университет.

Манідін Володимир Сергійович – провідний інженер з охорони праці, ВАТ «Запоріжсталь».

Миронова Татьяна Михайловна – д.т.н., профессор кафедры материаловедения Национальной металлургической академии Украины.

Михалев Александр Ильич – д.т.н., профессор, заведующий кафедрой информационных технологий и систем Национальной металлургической академии Украины.

Надточій Анжела Анатолівна – к.т.н., доцент, кафедри теорії металургійних процесів та загальної хімії, Національна металургійна академія України.

Ольшанский Василий Павлович – д. ф-м. н., профессор, кафедра теоретической механики и деталей машин, Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства.

Поладов Низами Гадим оглы – к.т.н., ст. препод. кафедры литейного и сварочного производства, Азербайджанский технический университет.

Рафальский Павел Николаевич – генеральный директор ПАО «ЕВРАЗ Днепродзержинский КХЗ».

Рахманов Сулейман Рахманович – к.т.н., доцент, кафедра теоретической механики, Национальная металлургическая академия Украины, директор ООО НПФ «Восток Плюс».

Старовойт Анатолий Григорьевич – д.т.н, професор, Національна металургійна академія України.

Сокур Юлія Іванівна – асистент, кафедри теорії металургійних процесів та загальної хімії; Національна металургійна академія України.

Сорокин Евгений Леонидович – к.т.н., доцент кафедры металлургического топлива и огнеупоров, Национальная металлургическая академия Украины.

Троценко Едуард Анатольевич – генеральный директор INFOCOM LTD (Ukrainan Siemens Partner).

Чемеринский Михаил Сергеевич – к.т.н., доцент, Національна металургійна академія України.

Шварцман Леонид Яковлевич – к.т.н., научный руководитель компании ООО «Силидо».

Шульга Александр Александрович – заместитель главного инженера по технологии – нач. технического отдела, ПАО «ЕВРАЗ Днепродзержинский КХЗ».