

Зарегистрирован
в Госкоминформ политики,
телевидения и радиовещания Украины
КВ № 6985 от 18 февраля 2003 года
Издается с июня 1993 года

Рекомендован к печати Ученым советом
Физико-технологического института
металлов и сплавов НАН Украины

Журнал входит в Перечень научных
профессиональных изданий Украины,
рекомендованных для публикации трудов
соискателей кандидатских и докторских степеней

№1-2'2019
(308-309)

МЕТАЛЛ ЛИТЬЕ Украины

наука техника технология бизнес

Учредитель: Физико-технологический институт металлов и сплавов Национальной академии наук Украины

Издатели: Физико-технологический институт металлов и сплавов Национальной академии наук Украины

Донецкий национальный технический университет

Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова Национальной академии наук Украины

Ассоциация литейщиков Украины

Украинская ассоциация сталеплавильщиков

Бочка В.В., Сова А.В., Двоеглазова А.В.	
Улучшение качества агломерата путем усовершенствования способа подготовки шихты.	3
Гришин А.М., Надточий А.А., Петренко В.А.	
Физико-химический анализ комплексного восстановления Cr_2FeO_4 с участием метана.	11
Писарский С.Н., Смирнов А.Н.	
Исследование современных представлений о природе формирования отложений в огнеупорах при разливке стали. Сообщение 1.	21
Дорошенко В.С.	
Концепция роторно-конвейерного комплекса для литья по газифицируемым моделям и термообработки отливок.	31
Лукьяненко И.В.	
Исследование процессов дифференциации структуры чугуновых отливок методом компьютерного моделирования.	41
Ясюков В.В., Лысенко Т.В., Воронова О.И., Солоненко Л.И.	
Анализ способов повышения эффективности литейного производства.	47
Цуркин В.Н.	
Системные подходы к решению проблемы обеспечения качества в литейном производстве.	56
Василев Я.Д., Замогильный Р.А., Гринкевич В.А.	
Влияние технологических параметров процесса холодной полосовой прокатки на производительность двухклетевых реверсивных станов	64
Ясев А.Г.	
Моделирование очистки поверхностей потоком абразивных частиц.	72
Сергеев С.Н.	
Новый высокоэффективный энергосберегающий комплекс газоочистного оборудования для прове- дения регулируемой очистки выбросов от машин и агрегатов металлургических производств. Сообщение 1.	77
Конференции в 2019 году.	84

редакционная коллегия

Найдек В. Л.	главный редактор, д-р техн. наук, проф., акад. НАН Украины, Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев
Дубоделов В. И.	зам. главного редактора, д-р техн. наук, проф., акад. НАН Украины, Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев
Минаев А. А.	зам. главного редактора, д-р техн. наук, чл.-кор. НАН Украины, Донецкий национальный технический университет, Донецк
Бойченко Б. М.	д-р техн. наук, проф., Национальная металлургическая академия Украины, Днепр
Борисов Г. П.	д-р техн. наук, проф., чл.-кор. НАН Украины, Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев
Бубликов В. Б.	д-р техн. наук, Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев
Величко А. Г.	д-р техн. наук, проф., чл.-кор. НАН Украины, Национальная металлургическая академия Украины, Днепр
Кириевский Б. А.	д-р техн. наук, проф., Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев
Ладохин С. В.	д-р техн. наук, проф., Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев
Лихошва В. П.	д-р техн. наук, проф., Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев
Лобанов Л. М.	акад. НАН Украины, Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев
Мазур В. Л.	д-р техн. наук, проф., чл.-кор. НАН Украины, Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев
Ноговицын А. В.	д-р техн. наук, Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев
Петренко В. А.	д-р техн. наук, акад. АИН Украины, засл. деятель науки и техники Украины, Национальная металлургическая академия Украины, Днепр
Смирнов А. Н.	д-р техн. наук, проф., Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев
Тарасевич Н. И.	д-р техн. наук, Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев
Шинский О. И.	д-р техн. наук, проф., президент Ассоциации литейщиков Украины, Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев
Гнилокурченко С. В.	канд. техн. наук, Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

редакция



Редактор
Анастасия Андреевна Горшкова

Корректор
Надежда Александровна Верховлюк



Макет
Сергей Анатольевич Цихмайстренко
Лилия Викторовна Школяренко



Верстка
Ольга Викторовна Козачко

адрес редакции и типографии

Украина, 03142, г. Киев-142, бул. Вернадского, 34/1
Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины
Телефон: (044) 424-04-10, 424-34-50, факс (044) 424-35-15
E-mail: mlu@ptima.kiev.ua
Информация о журнале на сайте: www.ptima.kiev.ua

Мнение редакции не всегда совпадает с мнением автора. Ответственность за достоверность представленных материалов несут авторы статей.
За рекламную информацию отвечают рекламодатели.

Сдано в набор 14.03.2019. Подписано в печать 17.05.2019. Формат 60x84/8. Бумага офсетная № 1. Печать на ризографе.
Уч.-изд. л. – 11,82. Усл.-печ. л. – 10,23. Усл. кр.-от. – 11,15. Тираж – 150. Отпечатано ООО «Про формат», ул. Маршала Жукова, 45 Б.

В.В. Бочка, д-р техн. наук, проф., проф. кафедры металлургии чугуна

А.В. Сова, мл. науч. сотр. кафедры металлургии чугуна, e-mail: owlartpoetry@gmail.com

А.В. Двоеглазова, канд. техн. наук, мл. науч. сотр. кафедры металлургии чугуна

Национальная металлургическая академия, Днепр, Украина

Улучшение качества агломерата путем усовершенствования способа подготовки шихты

Для получения качественного агломерата, стабилизированного по крупности и прочности, необходимо формировать в нем блочную структуру с оптимальным минералогическим составом межблочной связки, состоящей из ферритов кальция и железо-кальциевых оливинов.

Важным технологическим этапом получения качественного агломерата является подготовка агломерационной шихты к спеканию. Одним из направлений совершенствования подготовки агломерационной шихты является использование раздельного окомкования ее компонентов. Оно создает возможность управления процессом образования, роста сырых гранул, а также формированием их химического состава и свойств.

Для создания условий формирования агломерата заданного состава и свойств были проведены исследования особенностей подготовки шихты с использованием предварительно подготовленных композитов на основе концентрата. Композиты формировались таким образом, чтобы способствовать зарождению и росту гранул, равномерному распределению в них компонентов шихты.

Результаты исследования показали, что окомкование шихты с использованием предварительно подготовленных композитов приводит к: существенному уменьшению количества фракции 0–1 мм; увеличению эквивалентного диаметра гранул; уменьшению показателей среднеквадратического отклонения и коэффициента вариации, что свидетельствует о получении более однородного гранулометрического состава сырых гранул. В то же время в сырых гранулах существенно увеличивается содержание фракции +10 мм, которая негативно влияет на процесс спекания агломерата. Основной причиной этого может быть наличие в шихте крупных частиц руды и возврата, которые существенно влияют на процессы образования и роста гранул.

Экспериментальным путем подтверждено, что наилучшие результаты достигаются путем использования предварительно подготовленного композита (основность 0,95–1,0 ед.) из концентрата, руды, крупностью 0–3 мм, извести и части известняка, в то время как основность остаточной шихты составляет – 1,65–1,7 ед. Это создает условия для формирования прочной межблочной связки, состоящей, в основном, из оливинов низкой основности и ферритов.

В соответствии с технологической схемой подготовки шихты, вначале происходит дозирование, смешивание и окомкование предложенного композита, при этом оставшаяся шихта дозируется и смешивается отдельно. После этого происходит совместная грануляция композита и оставшейся шихты в барабане-грануляторе. Твердое топливо, крупностью 0–7 мм, подается в шихту в конце грануляции.

Ключевые слова: минералогический состав, связка, композит, основность, оливины, ферриты.

Постановка проблемы. Эффективность использования агломерата в доменной плавке заметно снижается вследствие значительной его неоднородности по химическому и гранулометрическому составу, а также низкой прочности. Разрушение агломерата осуществляется последовательно, начиная с разрыва слабых связующих и разрушения крупных пор [1]. Это свидетельствует о том, что прочность агломерата блочной структуры определяется в основном свойствами межблочной связки и наличия крупных пор.

Для получения качественного агломерата необходимо формировать в нем блочную структуру с оптимальным минералогическим составом межблочной связки. В работе [2] отмечается, что этому соответствуют связующие, содержащие в своем составе достаточное количество таких высокопрочных минералов, как ферриты кальция и железо-кальциевые оливины.

Формирование качества агломерата осуществляется на всех этапах его производства [3]. На рис. 1

приведена технологическая схема получения агломерата из шихты, которая содержит концентрат, железную руду, возврат, флюс, железосодержащие отходы производства, а также твердое топливо. Важным технологическим этапом является подготовка агломерационной шихты к спеканию, которая предусматривает совместную дозировку, смешивание, увлажнение и окомкование всех ее компонентов.

Следует отметить, что в данном способе подготовки шихты получить высокую степень однородности гранул по крупности и химическому составу проблематично из-за недостаточного учета поведения материалов во время увлажнения и окомкования, а также из-за значительных колебаний размеров частиц компонентов. Особенно это касается использования шихты, которая содержит значительное количество концентрата, крупностью менее 0,1 мм, и крупнозернистых компонентов, таких как железная руда и возврат. Кроме того, данная схема окомкования не обеспечивает в достаточной мере равномерное распределения компонентов в гранулах и установление

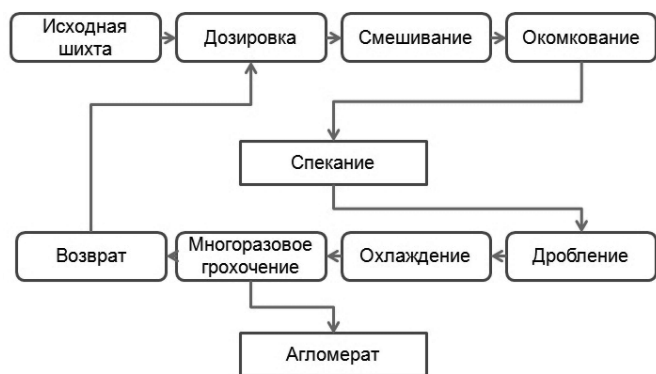


Рис. 1. Технологическая схема получения агломерата

контактов между частицами шихты, что негативно влияет на процессы твердо- и жидкофазного спекания агломерата. Это существенно ограничивает возможности формирования и производства агломерата заданной структуры и создает необходимость разработки новых путей совершенствования подготовки агломерационной шихты к спеканию.

Анализ последних исследований и публикаций. Одним из направлений совершенствования подготовки агломерационной шихты является использование раздельного окомкования ее компонентов. Оно создает возможность управления процессом образования, роста сырых гранул, а также формированием их химического состава и свойств. В работе [4] предложен способ двухстадийной технологии грануляции, в котором 70 % шихты увлажняли с избытком воды и гранулировали в малом барабане, а затем на полученные зародыши накатывали оставшуюся шихту. Это способствовало улучшению гранулометрического состава полученных гранул, однако предложенная технология не позволяет в полной мере обеспечить заданную однородность распределения в гранулах компонентов шихты и оптимизировать их взаимодействие в процессе окомкования. В работах [5, 6] авторы утверждают, что процесс образования гранул в барабане существенно улучшается без добавления в начальную шихту топлива. Предложенная технология решает проблему качественной подготовки шихты лишь частично, поскольку не влияет на эффективность взаимодействия остальных компонентов. В

работе [7] сделан вывод о том, что эффективность окомкования шихты возможно повысить в специальном барабане-окомкователе, в первой части рабочего пространства которого образуются зародыши гранул крупностью 2–2,6 мм, а во второй части уже осуществляется накат оставшейся шихты на поверхность зародышей, что приводит к увеличению крупности и прочности гранул.

Анализ литературных данных свидетельствует об актуальности проведения дальнейших теоретических и экспериментальных исследований особенностей спекания агломерата при использовании в шихте предварительно окомкованных материалов. Путем предварительной подготовки композитов определенного состава существует возможность создавать условия для оптимизации процессов взаимодействия материалов при окомковании и для образования в процессе спекания агломерата заданного состава и свойств.

Формулировка цели статьи. Теоретическое и экспериментальное обоснование путей совершенствования технологии подготовки агломерационной шихты к спеканию с целью формирования гранул заданного гранулометрического и минералогического состава.

Изложение основного материала и полученных научных результатов. В работе приведены результаты комплексных исследований процессов получения качественного агломерата. Термодинамический анализ возможности образования различных минералов в семикомпонентной системе (Fe, Si, Ca, Mg, Al, O, C), которая соответствует в целом составу агломерационной шихты, проводили с помощью программного комплекса путем оценки величины относительного изменения термодинамических показателей, таких как свободная энергия Гиббса и энтальпия (рис. 2).

На рис. 2 (а) приведена зависимость величины свободной энергии Гиббса от температуры. Видно, что при температурах 673–1173 К, свободная энергия для оливинов имеет наименьшие значения, что свидетельствует о наибольшей вероятности их образования в данной среде. При дальнейшем увеличении температуры величина свободной энергии для оливинов существенно увеличивается, а для других минералов она стремительно уменьшается. Это свидетельствует о том, что в данных условиях будут

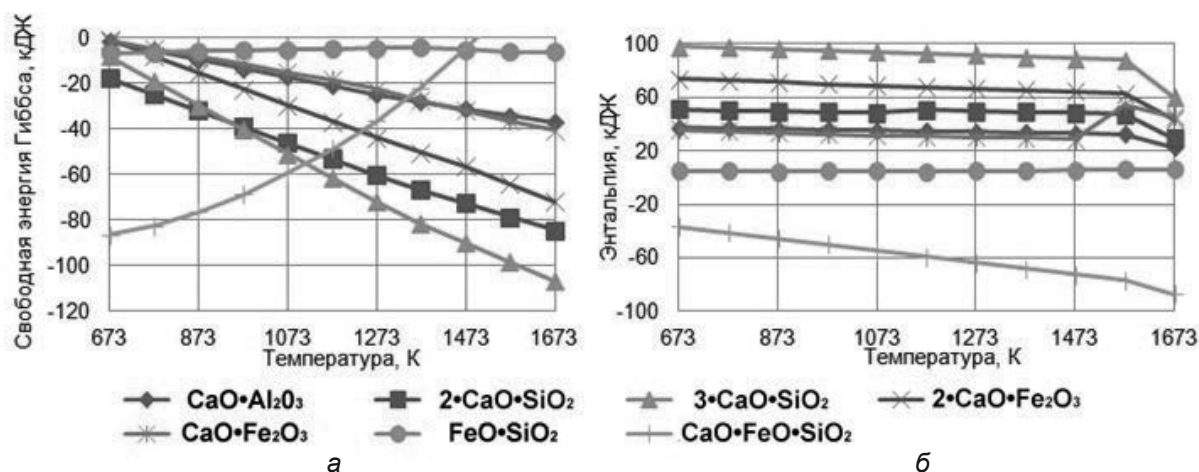


Рис. 2. Зависимость величины энергии Гиббса (а) и энтальпии (б) от температуры

преимущественно образовываться другие минералы, такие как силикаты и ферриты кальция.

На рис. 2 (б) приведена зависимость энтальпии от температуры. Величина энтальпии отличается при образовании различных минералов. Так, образование оливинов характеризуется существенным экзотермическим эффектом, в то время как другие минералы образуются в эндотермических условиях. Кроме того, для всех минералов, кроме оливинов, энтальпия практически не зависит от изменения температуры, кроме диапазона, в котором они меняют агрегатное состояние. Энтальпия реакции образования оливинов, в отличие от других минералов, с увеличением температуры существенно увеличивается, что объясняется изменением их основности.

Данные рис. 3 [8] свидетельствуют о том, что минералогический состав агломерата определяется в основном основностью агломерата. Наибольшее количество прочных железо-кальциевых оливинов и ферритов кальция образуются при показателях меньше 1,0 ед. и более 1,5 ед., соответственно. Хрупкое стекло образуется в максимальном количестве при основности 1,0–1,4 ед.

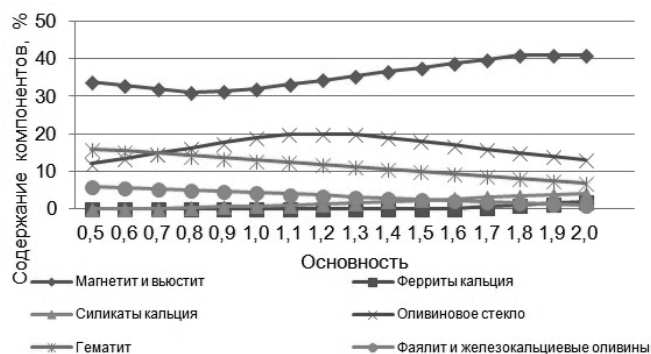


Рис. 3. Зависимость минералогического состава агломерата от его основности

Для создания условий формирования агломерата заданного состава и свойств были проведены исследования особенностей подготовки шихты с использованием предварительно подготовленных композитов на основе концентрата. Композиты формировались таким образом, чтобы способствовать зарождению и росту гранул, равномерному распределению в них компонентов шихты. Для оценки гранулометрического состава сырые гранулы разделяли на классы крупности с помощью сит с диаметрами отверстия: 1, 3, 5, 7, 10 мм. Анализ влияния композитов заданного состава на эффективность окомкования проводили с помощью следующих показателей: эквивалентного диаметра куса, коэффициента вариации крупности гранул, среднеквадратического отклонения крупности, количества мелочи, которая не окусковалась (фракции 0–1 мм).

Из компонентов аглошихты (концентрата (К), руды (Р), возврата (В), извести (И), известняка (Ик) предварительно изготавливали двух-, трех- и четырехкомпонентные композиты на основе концентрата, к которым затем добавляли оставшуюся шихту для совместного гранулирования.

В табл. 1 приведены результаты данных исследований. Видно, что использование отдельного окомкования в целом положительно влияет на процесс подготовки шихты. Окомкование шихты с использованием предварительно подготовленных композитов приводит к: существенному уменьшению количества фракции 0–1 мм; увеличению эквивалентного диаметра гранул; уменьшению показателей среднеквадратического отклонения и коэффициента вариации, что свидетельствует о получении более однородного гранулометрического состава сырых гранул. В то же время следует отметить, что при таком способе формирования композитов и их использовании при отдельном окомковании в сырых гранулах существенно увеличивается содержание фракции +10 мм, которая негативно влияет на процесс спекания агломерата. Основной причиной этого может быть наличие в шихте крупных частиц руды и возврата, которые существенно влияют на процессы образования и роста гранул.

Как видно из табл. 1 наилучшие результаты получены при окомковании шихты с использованием предварительно подготовленного композита КРИИк. Наличие железной руды и флюсов улучшает взаимодействие тонкоизмельченного концентрата с водой. Такой способ подготовки шихты создает условия для равномерного распределения флюсов в сырых гранулах.

Для повышения эффективности процесса окомкования с использованием предварительно подготовленного композита КРИИк было принято решение разделить руду на фракции: 0–3 мм, которая будет подаваться в состав композита, и 3–10 мм, которая будет использоваться в остальной шихте. Кроме того, в композит подается часть известняка крупностью 0–3 мм, остальной известняк подается в остальную шихту, что позволяет управлять основностью композита и остальной шихты.

Предложенная технологическая схема подготовки шихты с отдельным окомкованием представлена на рис. 4. В соответствии с ней вначале происходит дозирование, смешивание и окомкование предложенного композита, при этом оставшаяся шихта дозируется и смешивается отдельно. После этого происходит совместная грануляция композита и оставшейся шихты в барабане-грануляторе. Твердое топливо, крупностью 0–7 мм, подается в шихту в конце грануляции.

Использование данной технологии подготовки шихты дает возможность изменять основность композита и оставшейся шихты путем перераспределения количества известняка между ними, что обусловило необходимость проведения исследований влияния основности композита и оставшейся шихты на эффективность процессов грануляции шихты.

В работе проведено исследование влияния изменения количества известняка между композитом и оставшейся шихтой (табл. 2) на их основность, а также на однородность гранулометрического состава окомкованной шихты (табл. 3) и качество спеченного агломерата (табл. 4).

Результаты экспериментов, представленные в табл. 3–4, показали, что наилучшие результаты показателей крупности сырой шихты и качества

Показатели крупности исходной шихты при различных способах окомкования

Вариант окомкования		Содержание фракции, %						$d_{\text{экв}}, \text{мм}$	Среднеквадратическое отклонение	Коэффициент вариации
		+ 10 мм	7–10 мм	5–7 мм	3–5 мм	1–3 мм	0–1 мм			
Совместное		0,05	0,09	0,09	0,14	0,50	0,14	3,38	0,17	0,99
Раздельное	КР	0,31	0,18	0,11	0,15	0,23	0,01	6,45	0,10	0,62
	КИ	0,23	0,11	0,09	0,13	0,40	0,03	5,17	0,13	0,80
	КИк	0,29	0,11	0,10	0,16	0,32	0,01	5,77	0,12	0,70
	КРВ	0,22	0,13	0,09	0,14	0,38	0,04	5,15	0,12	0,71
	КРИ	0,15	0,13	0,13	0,17	0,41	0,01	4,94	0,13	0,78
	КРИк	0,35	0,08	0,10	0,10	0,33	0,04	5,84	0,14	0,82
	КВИ	0,24	0,10	0,08	0,12	0,43	0,03	5,06	0,15	0,87
	КВИк	0,04	0,12	0,11	0,13	0,56	0,04	3,71	0,20	1,19
	КИИк	0,20	0,10	0,11	0,16	0,40	0,01	5,06	0,13	0,79
	КРВИк	0,08	0,14	0,12	0,13	0,47	0,05	4,21	0,15	0,91
	КРВИ	0,14	0,14	0,10	0,15	0,45	0,02	4,66	0,15	0,88
	КРИИк	0,26	0,10	0,12	0,16	0,35	0,01	5,51	0,12	0,73
	КВИИк	0,32	0,14	0,10	0,19	0,23	0,01	6,22	0,11	0,64

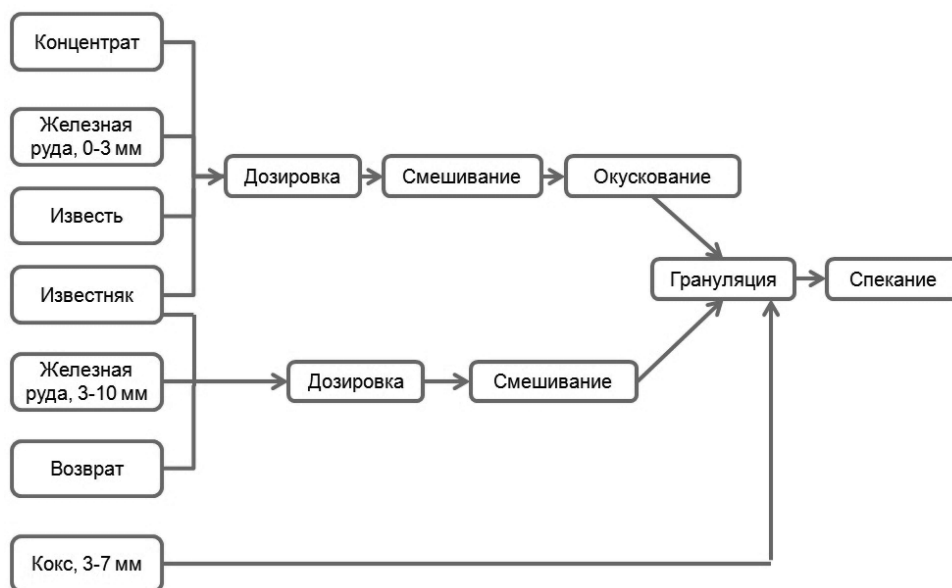


Рис. 4. Технологическая схема подготовки агломерационной шихты к спеканию, с использованием предварительно подготовленного композита КРИИк

спеченного агломерата достигаются в случае, когда основность предварительно подготовленного композита с концентрата, руды, крупностью 0–3 мм, извести и части известняка составляет 0,95–1,0 ед., а оставшейся шихты – 1,65–1,7 ед. Это можно объяснить тем, что создаются условия для формирования железо-кальциевых оливинов в основной массе шихты, и ферритов кальция в зонах концентрации остаточной шихты.

Спекание агломерата из шихты, подготовленной предложенным способом, по сравнению с классическим, позволяет получить агломерат высокого качества, о чем свидетельствуют увеличение

выхода годного на 10,29 %, и фракции + 5 мм, после испытания на прочность, на 11,5 %.

Выводы

Представлены результаты исследования особенностей технологии грануляции агломерационной шихты, которая предусматривает: раздельную подготовку композита и остаточной шихты с последующим их смешиванием, грануляцией и добавкой топлива фракцией 0–7 мм.

Показано, что наилучшие результаты достигаются при использовании предварительно подготовленного

Таблица 2

Варианты изменения состава композита и остаточной шихты

Шихта		Концентрат	Железная руда 0–3 мм	Железная руда 3–10 мм	Известь	Известняк	Возврат	Основность
	г							ед.
1	Общая шихта	1000	130	70	80	100	500	1,27
2	Композит	1000	130		80	7		0,95
	Остаток			70		93	500	1,71
3	Композит	1000	130		80	15		1,00
	Остаток			70		85	500	1,65
4	Композит	1000	130		80	23		1,05
	Остаток			70		77	500	1,59
5	Композит	1000	130		80	32		1,11
	Остаток			70		68	500	1,51
6	Композит	1000	130		80	40		1,15
	Остаток			70		60	500	1,45
7	Композит	1000	130		80	48		1,20
	Остаток			70		52	500	1,39
8	Композит	1000	130		80	56		1,25
	Остаток			70		44	500	1,32

Таблица 3

Характеристика гранулометрического состава в периоды исследований

Вариант окучивания	Содержание фракции, %						$d_{\text{экв}}, \text{мм}$	Среднеквадратическое отклонение	Коэффициент вариации
	+ 10 мм	7–10 мм	5–7 мм	3–5 мм	1–3 мм	0–1 мм			
1	0,050	0,090	0,090	0,140	0,500	0,140	3,435	0,170	0,990
2	0,130	0,094	0,204	0,240	0,320	0,012	4,929	0,110	0,662
3	0,135	0,085	0,210	0,218	0,334	0,018	4,882	0,112	0,670
4	0,180	0,076	0,175	0,195	0,350	0,024	4,988	0,112	0,675
5	0,161	0,096	0,178	0,145	0,390	0,030	4,869	0,122	0,731
6	0,139	0,060	0,197	0,256	0,333	0,015	4,780	0,120	0,719
7	0,245	0,050	0,243	0,135	0,310	0,035	5,511	0,113	0,669
8	0,250	0,075	0,121	0,169	0,350	0,035	5,257	0,117	0,702

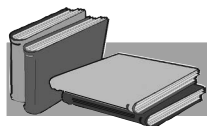
Таблица 4

Влияние изменения состава композита и оставшейся шихты на качество агломерата

Шихта	Выход годного агломерата, +10 мм, %	Выход агломерата после испытания на прочность, +5 мм, %	Содержание в агломерате фракции 0–5 мм, %
1	71,76	82	18
2	82,05	94,5	5,5
3	81,74	93	7
4	80,04	91,7	8,3
5	78,55	90,3	9,7
6	77,15	89,2	10,8
7	74,55	87	13
8	72,2	82,5	17,5

композита (основностью 0,95–1,0 ед.) с концентрата, руды, крупностью 0–3 мм, извести и части известняка, в то время как основность остаточной шихты составляет – 1,65–1,7 ед. Это создает условия для формирования прочной межблочной связки, состоящей, в основном, из оливинов низкой основности и ферритов кальция.

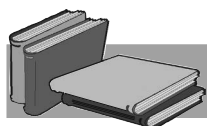
Результаты спекания агломерата показали, что применение предложенной технологии подготовки шихты позволяет увеличить выход годного агломерата на 10,29 %, и выход фракции + 5 мм на 11,5 % после испытания на прочность.



ЛИТЕРАТУРА

1. Хопунов Э.А. Селективное разрушение минерального и техногенного сырья. – Екатеринбург: ООО «УИПЦ», 2013. – 429 с.
2. Лившиц Б.А., Васильев Г.С. Исследование механических свойств основных компонентов железорудных агломератов // *Известия ВУЗов. Черная металлургия*. – 1964. – № 6. – С. 23–25.
3. Сулименко С.Е. Перспективные направления создания экологически чистой технологии получения агломерата повышенного качества в современных условиях. Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных трудов. – Днепропетровск. – 2014. – Выпуск 4 (93). – С. 32–38.
4. Романенко В.П., Попов Г.Н. Технология двухстадийного окомкования агломерационной шихты // Республиканская научно-техническая конференция «Теоретические основы и технология подготовки металлургического сырья к доменной плавке. – Днепропетровск, 1980. – С. 13–15.
5. Коршиков Г.В., Шаров С.И. и др. Влияние способа подачи топлива, его вида и крупности на показатели процесса спекания концентрата КМА // *Известия ВУЗов. Черная металлургия*. – 1971. – № 3. – С. 37–39. – № 6. – С. 39–42.
6. Вылупко Е.Е., Игнатов Н.В., Губа А.В., Усенко В.А., Белова А.П. Получение окускованного железорудного материала блочно-ячеистого строения // *Современные проблемы металлургии*. – 2011. – № 14. – С. 50–57.
7. Худяков А.Ю., Бойко М.Н., Баюл К.В., Ващенко С.В., Полякова Н.В., Петренко В.И. Альтернативные способы грануляции тонкоизмельченных железорудных концентратов // *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. – 2018. – № 1 (1). – С. 48–53.
8. Ефименко Г.Г., Гиммельфарб А.А., Левченко В.Е. Металлургия чугуна: учебник для вузов. – К.: Вища школа, 1981. – 496 с.

Поступила 03.04.2019



REFERENCES

1. Khopunov, E.A. (2013). Selective destruction of mineral and man-made materials. Ekaterinburg: ООО "UIPTS", 429 p. [in Russian].
2. Livshits, B.A., Vasilyev, G.S. (1964). Investigation of the mechanical properties of the main components of iron ore agglomerates. *Izv. vuzov. Ferrous metallurgy*, no. 6, pp. 23–25 [in Russian].
3. Sulimenko, S.E. (2014). Perspective directions of creation of ecologically pure technology for obtaining sinter of high quality in modern conditions. System technologies. Regional interuniversity collection of scientific papers. Dnepropetrovsk, 2014. Issue 4 (93), pp. 32–38 [in Russian].
4. Romanenko, V.P., Popov, G.N. (1980). Technology of two-stage pelletizing of sinter blend. Republican Scientific and Technical Conference "Theoretical foundations and technology of preparation of metallurgical raw materials for blast smelting", Dnipropetrovsk, pp. 13–15 [in Russian].
5. Korshikov, G.V., Sharov, S.I. et al. (1971). Influence of the method of fuel supply, its type and size on the indicators of the sintering process of KMA concentrate. *Izv. vuzov. Ferrous metallurgy*, no. 3, pp. 37–39, no. 6, pp. 39–42 [in Russian].
6. Vylupko, E.E., Ignatov, N.V., Guba, A.V., Usenko, V.A., Belova, A.P. (2011). Obtaining of the agglomerated iron ore material of a block-cellular structure. *Modern problems of metallurgy*, no. 14, pp. 50–57 [in Russian].
7. Khudyakov, A.Yu., Boyko, M.N., Bayul, K.V., Vashchenko, S.V., Polyakova, N.V., Petrenko, V.I. (2018). Alternative granulation methods for finely divided iron ore concentrates. *Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, no. 1 (1), pp. 48–53 [in Russian].
8. Efimenko, G.G., Gimmelfarb, A.A., Levchenko, V.E. (1981). Cast iron metallurgy: a textbook for universities. Kyiv: Vyshcha shkola, 496 p. [in Russian].

Received 03.04.2019

В.В. Бочка, д-р техн. наук, проф., проф. кафедри металургії чавуну
А.В. Сова, мол. наук. співр. кафедри металургії чавуну,
e-mail: owlartpoetry@gmail.com; **А.В. Двоєглазова**, канд. техн. наук, мол.
наук. співр. кафедри металургії чавуну

Національна металургійна академія України, Дніпро, Україна

Покращення якості агломерату шляхом удосконалення способу підготовки шихти

Для отримання якісного агломерату, стабілізованого за крупністю і міцністю, необхідно формувати у ньому блокову структуру з оптимальним мінералогічним складом міжблокової зв'язки, яка складається з феритів кальцію та залізо-кальцієвих олівінів.

Важливим технологічним етапом отримання якісного агломерату є підготовка агломераційної шихти до спікання. Одним із напрямів удосконалення підготовки агломераційної шихти є використання роздільного грудкування її компонентів. Воно створює можливість управління процесами утворення та зростання сирих гранул, а також формуванням їх хімічного складу і властивостей.

Для створення умов формування агломерату заданого складу і властивостей було проведено дослідження особливостей підготовки шихти з використанням попередньо підготовлених композитів на основі концентрату. Композити формувалися таким чином, щоб сприяти зародженню і росту гранул, та рівномірному розподілу в них компонентів шихти.

Результати дослідження показали, що грудкування шихти з використанням попередньо підготовлених композитів призводить до: суттєвого зменшення кількості фракції 0–1 мм; збільшення еквівалентного діаметру гранул; зменшення показників середньоквадратичного відхилення і коефіцієнта варіації, що свідчить про отримання більш однорідного гранулометричного складу сирих гранул. У той же час в сирих гранулах істотно збільшується вміст фракції +10 мм, яка негативно впливає на процес спікання агломерату. Основною причиною цього може бути наявність в шихті великих частинок руди і звороту, які суттєво впливають на процеси утворення і зростання гранул.

Експериментальним шляхом доведено, що найкращі результати досягаються шляхом використання попередньо підготовленого композиту (основністю 0,95–1,0 од.) з концентрату, руди, розміром 0–3 мм, вапна і частини вапняку, в той час як основність залишкової шихти становить – 1,65–1,7 од. Це створює умови для формування міцної міжблокової зв'язки, що складається, в основному, з олівінів низької основності і феритів.

Відповідно до технологічної схеми підготовки шихти, спочатку відбувається дозування, змішування і огрудкування запропонованого композиту, при цьому залишкова шихта дозується і змішується окремо. Після цього відбувається спільна грануляція композиту і залишкової шихти в барабані-грануляторі. Тверде паливо, розміром 0–7 мм, подається в шихту в кінці грануляції.

Ключові слова

Мінералогічний склад, зв'язка, композит, основність, олівіни, ферити.

Summary

V.V. Bochka, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Professor at the Department of Iron Metallurgy; **A.V. Sova**, Junior Researcher at the Department of Iron Metallurgy, e-mail: owlartpoetry@gmail.com; **A.V. Dvoeglazova**, Candidate of Engineering Sciences, Junior Researcher at the Department of Iron Metallurgy

National Metallurgical Academy of Ukraine, Dnipro, Ukraine

Improvement of the quality of agglomerate by improving the method of charge preparation

In order to obtain high-quality agglomerate stabilized in terms of grain size and strength, it is necessary to form a block structure with an optimal mineralogical composition of the interblock bond, which consists of calcium ferrites and iron-calcium olivines. An important technological step in obtaining high-quality agglomerate is the preparation of sinter charge for sintering. One of the ways to improve the preparation of the sinter charge is the use of separate pelletizing of its components. It creates the ability to control the processes of formation and growth of crude granules, as well as the formation of their chemical composition and properties.

To create the conditions for the formation of agglomerate of a given composition and properties, a study of the characteristics of the preparation of the charge with the use of pre-prepared composites based on concentrate was carried out. Compositions

were formed in such a way as to promote the emergence and growth of granules, and even distribution of the components of the charge in them.

The results of the study showed that the pelletizing of the charge using pre-prepared composites leads to: a significant reduction in the fraction amount of 0–1 mm; an increase in the equivalent diameter of the granules; reduction of the mean square deviation and coefficient of variation, indicating a more homogeneous granulometric composition of crude granules. At the same time, in the crude granules, the content of the fraction +10 mm is significantly increased, which negatively affects the sintering process of the agglomerate. The main reason for this may be the presence in the charge of large particles of ore and back, which significantly affect the processes of formation and growth of granules.

It has been experimentally proved that the best results are achieved by using a pre-prepared composite (basically 0.95–1.0 units) from concentrate, ore, 0–3 mm in size, lime and limestone, while the basicity of the residual charge is – 1.65–1.7 units. This creates the conditions for the formation of a strong interlacing bond, consisting mainly of olivines of low basicity and ferrites.

In accordance with the technological scheme of preparation of the charge, initially there is a dosage, mixing and pelletizing of the proposed composite, while the residual charge is dosed and mixed separately. After this, there is a common granulation of the composite and the residual charge in the drum granulator. Solid fuel, 0–7 mm in size, is fed to the charge at the end of the granulation.

Keywords

Mineralogical composition, bundle, composite, basicity, olivines, ferrites.

А.М. Гришин, канд. техн. наук, доц., доц. кафедры теории металлургических процессов и химии, e-mail: hryshyn@i.ua

А.А. Надточий, канд. техн. наук, доц., доц. кафедры теории металлургических процессов и химии, e-mail: Nadtochiy08@ukr.net

В.А. Петренко, д-р техн. наук, проф., проф. кафедры интеллектуальной собственности, e-mail: petrenko_v@email.ua

Национальная металлургическая академия Украины (НМетАУ), Днепр, Украина

Физико-химический анализ комплексного восстановления Cr_2FeO_4 с участием метана

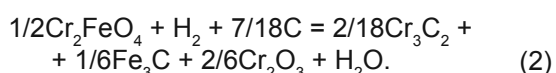
В работе представлены результаты термодинамического анализа комплексного восстановления хромита железа с участием метана при температурах, исключающих расплавление шихты. Рассмотрены некоторые возможные физико-химические модели восстановления. Термодинамически более вероятен процесс восстановления хромита железа метаном без диспропорционирования (при T выше 800 K). Восстановление хромита смесями ($\text{CH}_4 + \text{CO}_2$) и ($\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O}$) способствует развитию конверсии CH_4 при наличии каталитической поверхности, каковой может выступать $\text{Fe}_{\text{мет}}$. Сделан вывод о термодинамической предпочтительности реакций конверсии метана при температуре выше ~ 953 K, то есть в области восстановления хромита железа. По предложенной методике выполнен расчет температуры начала восстановления Cr_2FeO_4 метаном на первом и втором этапах восстановления. Рассчитан равновесный состав газовой фазы для реакции восстановления хромита метаном в случае непостоянства отношения углерод- и водородсодержащих газов (параметр n). На параметр n влияют два противоположных процесса – реакция газификации углерода, которая приводит к уменьшению параметра n , и распад метана, который способствует увеличению содержания водородсодержащих газов. Предложена методика и выполнен расчет параметра n для восстановления хромита железа метаном, по полученным данным построены температурные зависимости параметра n для первого и второго этапов восстановления хромита при условии стехиометрического соотношения $(\text{C} + \text{H}_2)/\text{O}$. При дефиците углерода реализуется более сложная схема, которая характеризуется различной степенью завершения процесса в зависимости от соотношения C/O . Выполнено термодинамическое моделирование системы Cr-Fe-C-O-H для вариантов восстановления хромита железа смесями метана с водяным паром и диоксидом углерода. Показано, что равновесная газовая фаза при $T > 1173$ K имеет высокий восстановительный потенциал, что дает возможность использовать отходящий газ в технологическом процессе. Подтверждена принципиально возможная схема организации процесса с использованием неконвертированного природного газа.

Ключевые слова: хромит железа, природный газ, комплексное восстановление, карбид хрома, термодинамическое моделирование.

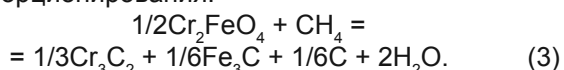
Постановка проблемы. Разработка физико-химических основ получения многокомпонентных губчатых лигатур с низким содержанием углерода на основе природных либо техногенных материалов является актуальной задачей. Промышленное производство таких материалов требует привлечение сырого либо конвертированного природного газа, основным компонентом которого является метан (CH_4). Использование метана в металлургии, в том числе в процессе восстановления хрома из сложных систем, было предметом многочисленных исследований [1, 2]. Метан уже при низких температурах на твердых поверхностях способен диспропорционировать [3, 4] по реакции:



Продукты реакции (1) обеспечивают восстановление хромита железа:



Возможно также восстановление хромита железа «сырым» метаном, то есть без предварительного диспропорционирования:



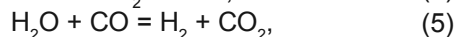
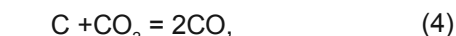
Следует отметить, что реакция (3) при $T > 823$ K термодинамически более вероятна, однако, при этих температурах метан диспропорционирует (1). Авторы работы [5] считают, что восстанавливающим агентом является углерод, доставляемый газообразными углеродсодержащими молекулами и радикалами, например, C_3O_2 , CH_4 , CH_3 , CH_2 , CH и др. к поверхности зерен хромита. Таким образом, термодинамический анализ сведен к углеродотермическому восстановлению хромита, что не отражает реальную картину процесса. Например, при $T > 895$ K возможна паровая и углекислотная конверсия природного газа, что благоприятствует газовому восстановлению.

Изложение основных материалов исследования. Анализируемая система Cr-Fe-C-O-H пятикомпонентная, имеет 2 степени свободы и равновесие системы задается двумя параметрами T и P_{Σ} . Для расчета равновесного состава газовой фазы, при $T \leq T_p$, где T_p – температура начала паровой газификации карбида, был использован алгоритм, описанный в работе [6], результаты расчетов близки к полученным авторами статьи данным для восстановления оксида хрома метаном.

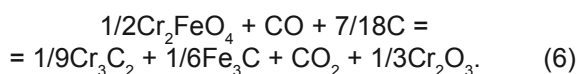
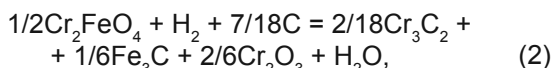
Переход от газового к комплексному восстановлению термодинамически возможен при достижении температуры начала паровой газификации

углеродистого восстановителя ($C_{\text{тв}}$ либо карбид). Соотношение равновесных давлений компонентов газовой фазы зависит от температуры, общего давления и выбранного отношения α/β , где $\beta = P_{\text{H}_2} + P_{\text{H}_2\text{O}} + P_{\text{CH}_4}$, $\alpha = P_{\text{CO}} + P_{\text{CO}_2} = 1 - \beta$. При этом необходимо иметь в виду, что отношения α/β будет изменяться по ходу процесса, что будет проанализировано ниже.

Адекватно описать первый этап процесса комплексного восстановления хромита метаном позволяет совокупность реакций:

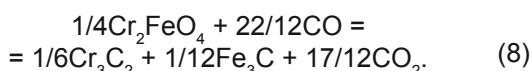
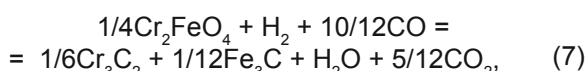


а так же реакций, получающих свое развитие после образования H_2 и CO :



Примем, что система имеет некоторый дефицит углерода – это позволит проанализировать процесс на всех этапах. Используя приведенный в работе [6] алгоритм, были рассчитаны T_p хромита с участием метана для первого этапа, полученные данные представлены в табл. 1. Здесь же приведены температуры начала восстановления оксида хрома метаном и комплексного восстановления Cr_2O_3 . Сопоставление приведенных данных показывает близость температур начала восстановления Cr_2O_3 метаном и комплексного восстановления. При восстановлении хромита железа температура значительно ниже, что косвенно подтверждает последовательность восстановления железа и далее хрома.

При $T > T_p$ свободный углерод термодинамически неустойчив и не участвует в процессе восстановления Cr_2FeO_4 , тогда система описывается реакциями газового восстановления хромита:



В рассматриваемом диапазоне температур анализируемая система имеет 3 степени свободы. При заданных значениях $P_{\Sigma} = 1$ и соотношении α/β равновесие является безвариантным в условиях избранной температуры. Расчет равновесного состава газовой фазы выполнен на базе реакций (8) и (7) (см. [6]):

$$K_8 = P_{\text{CO}_2}^{17/12} / P_{\text{CO}}^{22/12} = \frac{(\alpha - P_{\text{CO}})^{17/12}}{P_{\text{CO}}^{22/12}}; K_8^{12/17} = \frac{\alpha - P_{\text{CO}}}{P_{\text{CO}}^{22/17}},$$

откуда получим:

$$X + K_8^{12/17} \cdot X^{22/17} - \alpha = 0,$$

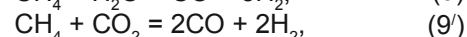
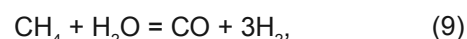
где $X = P_{\text{CO}}$. Равновесное давление диоксида углерода находим по разности $(\alpha - P_{\text{CO}})$.

Используя полученные значения P_{CO} и P_{CO_2} , можно определить равновесное отношение $P_{\text{H}_2\text{O}}/P_{\text{H}_2}$:

$$K_7 = \frac{P_{\text{H}_2\text{O}} \cdot P_{\text{CO}_2}^{5/12}}{P_{\text{H}_2} \cdot P_{\text{CO}}^{10/12}}; \frac{P_{\text{H}_2\text{O}}}{P_{\text{H}_2}} = K_7 \cdot \frac{P_{\text{CO}}^{10/12}}{P_{\text{CO}_2}^{5/12}} = A,$$

$$\text{откуда } P_{\text{H}_2\text{O}} = A \cdot P_{\text{H}_2}.$$

Равновесную концентрацию CH_4 рассчитаем, используя реакции конверсии метана:

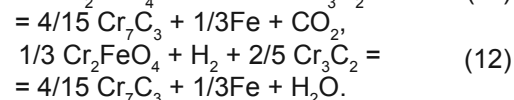
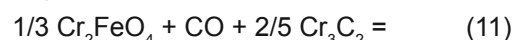


$$P_{\text{CH}_4} = \beta - (1 + A) \cdot P_{\text{H}_2}; \frac{P_{\text{H}_2}^2}{\beta - (1 + A) \cdot P_{\text{H}_2}} = K_9' \cdot \frac{P_{\text{CO}_2}}{P_{\text{CO}}^2} = B; P_{\text{H}_2}^2 + B \cdot (1 + A) \cdot P_{\text{H}_2} - B \cdot \beta = 0.$$

При условии начального дефицита углерода в шихте (О/С меньше стехиометрического), на определенной стадии процесса весь углерод израсходован, и роль восстановителя, при достижении необходимой температуры, переходит к карбиду Cr_3C_2 . Таким образом, включается второй этап восстановления: $\text{Cr}_2\text{FeO}_4 \rightarrow \text{Cr}_7\text{C}_3 + \text{Fe}$. Возможность сохранения карбида железа на этом этапе термодинамически исключена, так как уровень концентрации CO_2 и H_2O , необходимый для газификации Cr_3C_2 , будет, безусловно, окислительным для Fe_3C . Газификация Cr_3C_2 за счет CO_2 и H_2O можно представить реакциями:



Комплексное восстановление хромита на втором этапе, при $T \leq T_p$, описывается реакциями:



Однако строго термодинамически необходимо учитывать и степень незавершенности восстановления на первом этапе, что определяет состав кислородсодержащей фазы. При этом реакции (11) и (12)

Таблица 1

Термодинамически разрешенная температура начала восстановления Cr_2FeO_4 до $\text{Cr}_3\text{C}_2 + \text{Fe}_3\text{C}$ в зависимости от α

α	0,15	0,25	0,35	0,45	0,55	0,65	0,75	0,85	0,95	1,0
T, K	1233,9	1262,0	1281,2	1296,0	1308,0	1318,3	1327,3	1335,1	1342,1	1345,4
1)	1276,2	1305,4	1325,5	1340,8	1353,4	1363,9	1373,1	1381,3	1388,6	1392,0
2)	1275,6	1304,9	1324,9	1340,2	1352,7	1363,7	1372,5	1380,7	1388,1	1391,5

1) – восстановление Cr_2O_3 метаном; 2) – комплексное восстановление Cr_2O_3

Термодинамически разрешенная температура начала восстановления Cr_2FeO_4 до $\text{Cr}_7\text{C}_3 + \text{Fe}$ в зависимости от α

α	0,15	0,25	0,35	0,45	0,55	0,65	0,75	0,85	0,95	1,0
T, K	1316,2	1342,2	1359,8	1373,5	1384,3	1393,7	1401,7	1408,8	1415,2	1418,2
1)	1445,0	1479,4	1502,7	1521,0	1535,7	1548,2	1559,1	1568,7	1577,4	1581,4
2)	1445,1	1479,4	1502,9	1520,9	1535,7	1548,3	1559,1	1568,8	1577,4	1581,4

1) – восстановление Cr_2O_3 метаном; 2) – комплексное восстановление Cr_2O_3

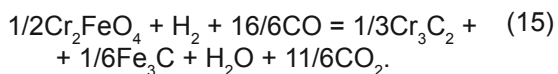
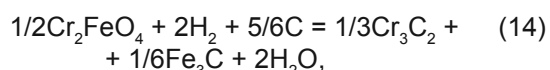
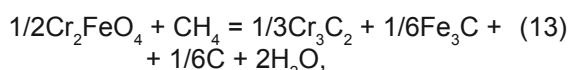
необходимо записать иначе, однако, в этой части работы авторы статьи используют приведенную форму записи уравнений. Расчет T_p и равновесного состава газовой фазы для второго этапа восстановления хромита железа метаном выполнен по приведенному выше алгоритму. Результаты представлены в табл. 2.

Необходимо отметить, что приведенные уравнения реакций для второго этапа, равно как и для первого, носят условный характер. Восстановление хромита железа метаном будет сопровождаться образованием и участием в процессе совместных карбидов – $(\text{Cr}, \text{Fe})_n\text{C}_m$, для которых отсутствуют термодинамические данные. Образующееся в ходе восстановления железо, после достижения максимального уровня замещения хрома в тригональном карбиде, и далее, не будет инертно к процессам, протекающим в системе. Возможно появление металлической фазы, в виде твердого раствора хрома в железе (Fe-Cr), что термодинамически облегчает течение реакций (11) и (12). Появление твердого металлического раствора термодинамически возможно, если этот процесс более предпочтителен, чем образование карбидов с участием хрома.

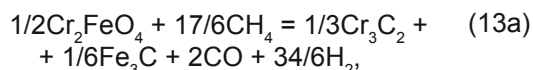
Превышение температуры над T_p для второго этапа делает термодинамически неустойчивым карбид Cr_3C_2 , и равновесный состав газовой фазы рассчитывается по аналогии с первым этапом.

В данной работе третий этап не рассматривается, так как, по расчетам авторов статьи, твердофазное восстановление хромита железа карбидом Cr_7C_3 , точнее $(\text{Cr,Fe})_7\text{C}_3$, требует высоких температур, что приведет к появлению жидкой фазы.

Проведенный выше анализ основывается на представлении о предварительном распаде метана на углерод и водород (реакция (1)), что может не соответствовать реальной картине процесса. Формально, в зависимости от физико-химической модели, возможны три варианта процесса:



Первый – восстановление «сырым» метаном, второй – продуктами распада и третий – продуктами конверсии метана. Термодинамически более вероятен первый – восстановление метаном без диспропорционирования (при T выше $\sim 800\text{K}$). Однако, возможен и иной вариант реализации реакции (13):



для которого основная роль восстановителя отводится углероду. Этот вариант имеет большую термодинамическую вероятность, чем (13). Таким образом, представления о физико-химической модели процесса должны предшествовать термодинамическому анализу. Представляют интерес некоторые публикации [7, 8], связанные с изучением возможности осуществления конверсии метана кислородом оксида, результатом которой было получение «синтез-газа» при умеренных температурах ($700\text{--}800^\circ\text{C}$). Восстановление Cr_2FeO_4 и конверсия (либо диспропорционирование) метана – это два сложно сопряженных звена, определяющих физико-химическую модель процесса в целом. Учитывая высокую чувствительность этих реакций к внешним и внутренним факторам, сложно выбрать один вариант процесса твердофазного восстановления оксида метаном.

По результатам приведенных исследований [7, 8], восстановление оксидов железа метаном сопровождалось значительным загрязнением продукта сажистым углеродом, образование которого отмечалось при появлении $\text{Fe}_{\text{мет}}$. Авторами было исследовано восстановление оксидов железа смесями $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O}$, что позволяло значительно снизить отложение сажистого углерода, а равновесный газ содержал до 70 % ($\text{H}_2 + \text{CO}$) при максимальной степени восстановления. При восстановлении Cr_2FeO_4 метаном углерод может появляться до начала восстановления хрома и активность его высокая, что позитивно повлияет на процесс. Однако этот аспект требует дополнительного исследования. Восстановление хромита смесями ($\text{CH}_4 + \text{CO}_2$) и ($\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O}$) будет способствовать развитию конверсии CH_4 , при наличии каталитической поверхности, каковой может выступать $\text{Fe}_{\text{мет}}$ и процесс будет приближаться к реакции (15). Возможна также и реакция газификации сажистого углерода за счет CO_2 либо H_2O , однако термодинамическую предпочтительность имеют реакции конверсии. На рис. 1,а представлены температурные зависимости энергии Гиббса реакций диспропорционирования и конверсии метана, а также газификации углерода.

Эти данные позволяют сделать вывод о термодинамической предпочтительности реакций конверсии метана при температуре выше $\sim 953\text{K}$, то есть в области восстановления хромита железа, это свидетельствует о возможности восстановления по реакции (15). Конверсия метана кислородом оксида термодинамически более вероятна, чем углекислотная и паровая. Однако весьма сложно определить ее модель, так как процесс представляет собой сложное

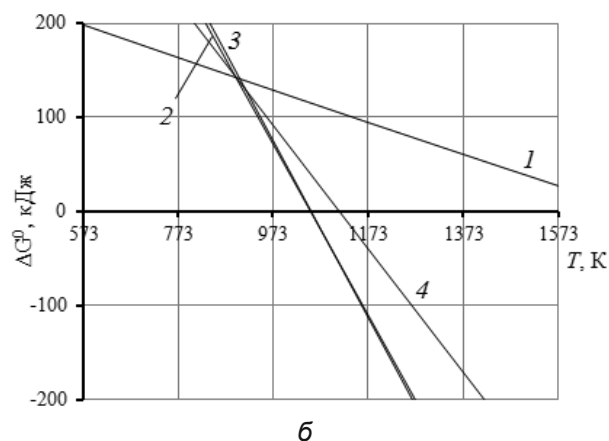
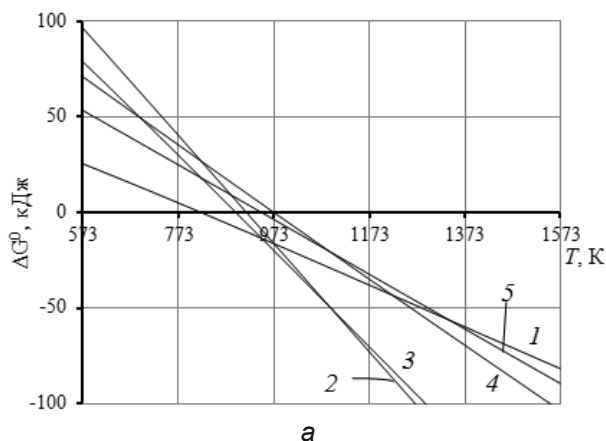
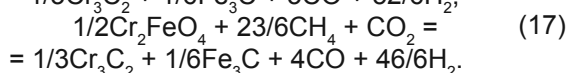
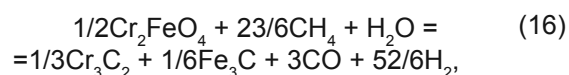


Рис. 1. Изменение энергии Гиббса для реакций: а) 1 – $\text{CH}_4 = \text{C} + 2\text{H}_2$; 2 – $\text{CH}_4 + \text{CO}_2 = 2\text{CO} + 2\text{H}_2$; 3 – $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} = \text{CO} + 3\text{H}_2$; 4, 5 – газификация углерода CO_2 и H_2O и б) 1, 2, 3, 4 – реакции (13), (16), (17) и (13а), соответственно

сопряжения адсорбционно-химических и диффузионных звеньев, реализация которых зависит от многих факторов, не являющихся постоянными в течение процесса.

Восстановление смесями можно представить реакциями:



Анализируя вероятность реакций (16) и (17), а также (13) и (13а), можно отметить, что наиболее вероятно протекание процесса по реакциям (16) и (17) (рис. 1, б), которые имеют практически равную термодинамическую вероятность. Газообразные продукты восстановления хромита смесями обладают высоким восстановительным потенциалом, что дает возможность использовать их в дальнейшем.

Восстановление Cr_2FeO_4 метаном можно условно разделить на два периода: до появления металлического железа и после. Для диспропорционирования метана или его конверсии необходима каталитическая поверхность, роль которой может выполнять образующееся металлическое железо. На первом периоде, до образования $\text{Fe}_{\text{мет}}$, восстановление возможно за счет CH_4 , а также продуктов частичного диспропорционирования мета-

на ($\text{C} + \text{H}_2$). Термодинамически более предпочтительно восстановление за счет CH_4 . Однако, как уже отмечалось, нет четкого представления о модели такого взаимодействия, в частности конверсии метана кислородом оксида, что затрудняет термодинамический анализ.

Авторами статьи выполнено термодинамическое моделирование системы в параметрах, соответствующих реакциям (16) и (17). Результаты, представленные на рис. 2, отображают компоненты, значения которых более 0,1 кмоль.

Результаты моделирования позволяют сделать некоторые выводы. В целом оба варианта по многим компонентам имеют, качественно, близкую термодинамическую картину. Также в обоих вариантах равновесная концентрация водорода высокая, что, вероятно, свидетельствует о большей термодинамической предпочтительности восстановителя – углерода. Равновесная газовая фаза при $T > 1173\text{K}$ имеет высокий восстановительный потенциал ($\text{H}_2 + \text{CO} \approx 15$ кмоль), что дает возможность использовать отходящий газ в технологическом процессе.

Восстановление хромита железа метаном, равно как и других оксидов, можно рассматривать как процесс с участием водород- и углеродсодержащих газов. Отношение между ними определяется параметром

$$n = \frac{\text{H}_2}{\text{C}} = \frac{P_{\text{H}_2} + P_{\text{H}_2\text{O}} + 2P_{\text{CH}_4}}{P_{\text{CO}} + P_{\text{CO}_2} + P_{\text{CH}_4}}, \quad \text{значение которого из-}$$

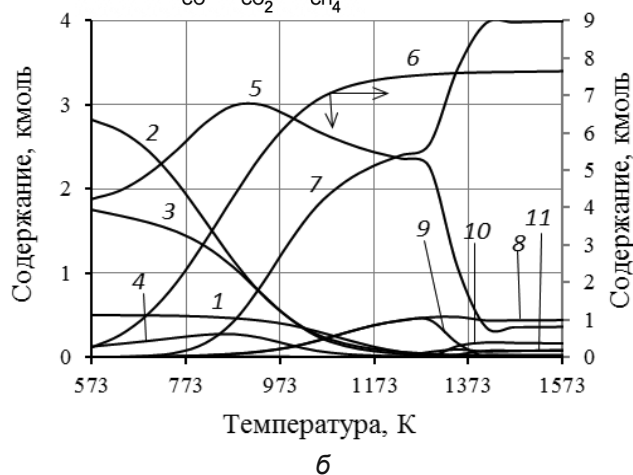
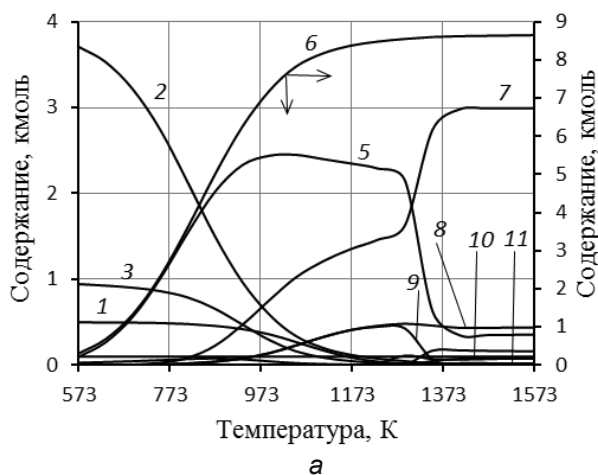
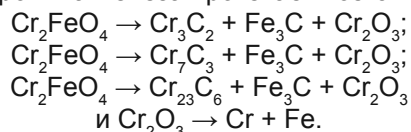


Рис. 2. Термодинамическое моделирование системы Cr-Fe-O-C-H при восстановлении: а – смесью ($\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O}$) и б – смесью ($\text{CH}_4 + \text{CO}_2$), где: 1 – Cr_2FeO_4 ; 2 – CH_4 ; 3 – H_2O ; 4 – CO_2 ; 5 – C ; 6 – H_2 ; 7 – CO ; 8 – Fe ; 9 – Cr_2O_3 ; 10 – Cr_3C_2 ; 11 – Cr

меняется в течение процесса и зависит от T , P , стадии процесса и других факторов. Знание закономерностей изменения этой величины позволит глубже понять термодинамические основы процесса восстановления сложных оксидов. В данной части работы акцент был сделан на анализ условий процесса восстановления хромита, влияющих на параметр n . На состав равновесной газовой фазы в значительной мере оказывает влияние исходный состав газа. В целом для пятикомпонентной системы Cr-Fe-O-C-H равновесие устанавливается между пятью фазами: Cr_2FeO_4 , Cr_3C_2 , Fe_3C , углеродом и газовой фазой. Система имеет две степени свободы, и равновесный состав ее газовой фазы может быть однозначно задан любой парой параметров: T , P и n . Развитие реакции газификации углерода приводит к уменьшению параметра n , в то время как распад метана способствует увеличению содержания водородсодержащих газов. Таким образом, на параметр n влияют два противоположных процесса, а значение параметра определяется температурой при $P = \text{const}$, либо давлением при $T = \text{const}$. Значение n остается постоянным при отсутствии газификации углерода и распада метана. Вместе с тем при восстановлении сложного оксида, Cr_2FeO_4 , параметр n , вероятно, изменяется также в зависимости от этапа процесса, что требует детального анализа.

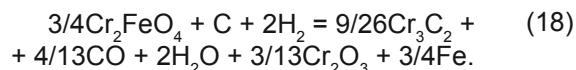
Расчет величины n для первого этапа выполнен на основе независимых реакций, определяющих равновесие системы Cr-Fe-O-C-H, а именно (1), (2), (5), (6) и (9). Образующийся по реакции (1) углерод имеет активность, равную единице. Для процесса восстановления Cr_2FeO_4 метаном, значение параметра n находится в диапазоне $\infty > n > 0$ в зависимости от условий. Крайние значения параметр принимает для варианта комплексного восстановления с участием CO либо H_2 . Приведенная система уравнений для реакций (1), (2), (5), (6) и (9) справедлива для стехиометрического отношения $(\text{C} + \text{H}_2)/\text{O}$. При отклонении от стехиометрии, дефиците восстановителя, восстановление хромита железа протекает поэтапно:



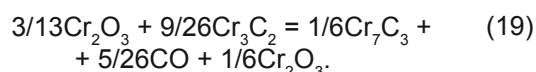
Начало каждого этапа термодинамически возможно при определенной температуре, а роль углеродистого восстановителя последовательно переходит по схеме $\text{C} \rightarrow \text{Cr}_3\text{C}_2 \rightarrow \text{Cr}_7\text{C}_3 \rightarrow \text{Cr}_{23}\text{C}_6$. Также следует отметить, что при восстановлении Cr_2FeO_4 образуются совместные карбиды – $(\text{Cr,Fe})_n\text{C}_m$, для которых отсутствуют термохимические данные. Вместе с тем, учитывая, что на начальной стадии восстанавливается преимущественно железо хромита, первый этап может завершаться образованием Cr_2O_3 либо, что более вероятно, $\text{Cr}_2\text{FeO}_4 + \text{Cr}_2\text{O}_3$. Восстановленное железо при наличии в системе углерода и высокого равновесного давления CO превращается в Fe_3C , который может растворять в себе небольшое количество атомов хрома, образуя легированный цементит. Сверх равновесные атомы хрома (по отношению к легированному цементиту) образуют карбид, кото-

рый служит основой формирования совместного карбида – $(\text{Cr,Fe})_n\text{C}_m$. На завершающей стадии первого этапа легированный цементит может выступать как восстановитель, одновременно с углеродом, подтверждением этого может служить близость температур начала восстановления Cr_2FeO_4 углеродом и карбидом железа. Водород участвует в процессе как восстановитель, а также совместно с CO_2 в газификации карбида (либо углерода) водяным паром.

Отклонение от стехиометрии приводит к различной степени завершенности процесса (% ω). Так при $(\text{C} + \text{H}_2)/\text{O} = 1$ и отношении $\text{H}_2/\text{C} = 2$, что соответствует метану, восстановление в исследуемом температурном диапазоне реализуется на первом этапе по реакции:



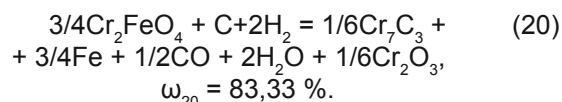
На втором этапе взаимодействие осуществляется между оставшимся оксидом хрома углеродом карбидной фазы и водородом. Однако, исходя из постоянного отношения $(\text{C} + \text{H}_2)/\text{O}$, равное 1, водород весь израсходован на первом этапе. Таким образом, на втором этапе взаимодействие осуществляется по реакции:



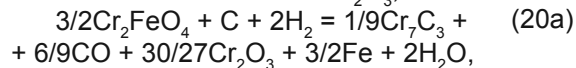
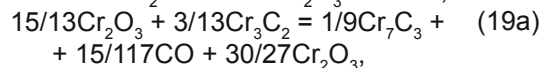
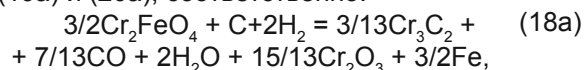
Достижимые степени восстановления на первом и втором этапах составляют: $\omega_{18} = 76,92\%$; $\omega_{19} = 27,78\%$.

Причем довосстановление по кислороду на втором этапе составляет $\omega = 6,41\%$ и тогда $\omega_{\Sigma} = 83,33\%$.

При восстановлении сразу до Cr_7C_3 по реакции:



Уменьшение отношения $(\text{C} + \text{H}_2)/\text{O}$ до 1/2 приводит к снижению степени восстановления на каждом этапе и в целом. В продуктах первого этапа соотношение C/O составляет 1,13, то есть, исходя из постоянства $(\text{C} + \text{H}_2)/\text{O} = 1/2$, на втором этапе водорода не должно быть. Взаимодействие на первом, втором этапах и сразу до Cr_7C_3 осуществляется по реакциям (18а), (19а) и (20а), соответственно:



$$\omega_{18a} = 41,94\%, \quad \omega_{19a} = 3,70\%, \quad \omega_{20a} = 44,08\%.$$

Довосстановление по кислороду на втором этапе составит $\omega = 2,14\%$ и $\omega_{\Sigma} = 41,94 + 2,14 = 44,08\%$.

Присутствие в системе карбида железа термодинамически маловероятно, атомы железа участвуют в формировании совместных железо-хромистых карбидов. По оценкам авторов [9], примерно 18 % железа путем изоморфного замещения войдет в состав этого карбида, а оставшееся железо, совместно с атомами хрома, формируют металлическую фазу, либо образуют совместный карбид – $(\text{Cr,Fe})_7\text{C}_3$,

имеющий более высокую степень замещения хрома железом.

Расчет равновесного состава газовой фазы выполнен на основе выражений для констант равновесия реакций (1), (2), (5), (6) и (9), общего давления системы, а также выбранного варианта организации процесса: $T, n = \text{const}$ либо $P, T = \text{const}$. В данном случае мы не ограничиваем систему заданными величинами α и β , что позволяет рассчитать значение параметра n в зависимости от температуры. Выражение для расчета n приведено выше.

$$K_1 = \frac{P_{H_2}^2}{P_{CH_4}}; K_9 = \frac{P_{H_2}^3 \cdot P_{CO}}{P_{CH_4} \cdot P_{H_2O}}; K_2 = \frac{P_{H_2O}}{P_{H_2}}; K_6 = \frac{P_{CO_2}}{P_{CO}},$$

$$P_{\Sigma} = P_{CO} + P_{CO_2} + P_{H_2} + P_{H_2O} + P_{CH_4}.$$

Для варианта $T = \text{const}$ и $n = \text{const}$ решение системы уравнений позволяет получить выражения для расчета равновесного состава газовой фазы:

$$P_{CO} = \frac{K_9 \cdot K_2}{K_1}; P_{CO_2} = \frac{K_9 \cdot K_2 \cdot K_6}{K_1};$$

$$P_{H_2O} = K_2 \cdot P_{H_2}; P_{CH_4} = \frac{P_{H_2}^2}{K_1};$$

$$(n-2) \cdot P_{H_2}^2 - K_1(K_2+1) \cdot P_{H_2} + n \cdot K_9 \cdot K_2(K_6+1) = 0.$$

При выборе в качестве независимых параметров T, P_{Σ} выражения для расчета равновесных парциальных давлений газов имеют вид:

$$P_{CO} = \frac{K_9 \cdot K_2}{K_1}; P_{CO_2} = \frac{K_9 \cdot K_2 \cdot K_6}{K_1};$$

$$P_{H_2O} = K_2 \cdot P_{H_2}; P_{CH_4} = \frac{P_{H_2}^2}{K_1};$$

$$P_{H_2} = -\frac{K_1(K_2+1)}{2} + \sqrt{\frac{K_1^2 \cdot (K_2+1)^2}{4} + K_1 \cdot P_{\Sigma} - K_9 \cdot K_2 \cdot (K_6+1)}.$$

Причем положительное значение P_{H_2} реализуется при $P_{\Sigma} > \frac{K_9 \cdot K_2 \cdot (K_6+1)}{K_1}$, что соответствует $P_{\Sigma} > (P_{CO} + P_{CO_2})$.

В рассматриваемом случае параметр n зависит от температуры и общего давления в системе. Полученные результаты расчета равновесного состава газа и параметра n для первого этапа ($T \leq T_p$) представлены на рис. 3 и 4.

Как уже отмечалось выше, на параметр n влияют два противоположных звена процесса восстановления: распад метана (конверсия) и газификация углерода. Увеличение водородсодержащих газов в низкотемпературной зоне обеспечивает распад метана, при температуре более $\sim 1320\text{K}$ доминирует процесс газификации углерода, что выражается в снижении параметра n . Следует отметить, что температура смены доминирующего процесса достаточно близка к температуре начала комплексного восстановления хромита железа и если не учитывать конверсию метана, то приведенное выше обоснование изменения параметра подтверждается термодинамическими данными, представленными на рис. 1, а.

Паровая либо углекислотная конверсия метана термодинамически более предпочтительна, чем газификация углерода либо распад метана, начиная с $T \sim 923\text{K}$ (см. рис. 1, а), но это не находит своего проявления в зависимости: $n = f(T)$.

Таким образом, на параметр n влияют не только приведенные выше звенья, но и более сложный комплекс факторов, ведущая роль среди которых вероятно занимает приоритетное участие углерода либо водорода в процессе восстановления. Не следует также исключать прямое взаимодействие метана с кислородом оксида самостоятельно, либо при участии CO_2 и H_2O (реакции (13), (13а), (16) и (17)), что требует отдельного исследования.

Расчет равновесного состава газовой фазы выполнен при $n \neq \text{const}$ и для $P_{\Sigma} = 1; 2$. Характер температурных зависимостей компонентов газовой фазы (P_i) близок к варианту восстановления оксида хрома метаном при $n = \text{const}$ [6], однако есть некоторые количественные расхождения.

При температурах, превышающих T_p , свободный углерод нестабилен и не участвует в равновесии реакций комплексного восстановления Cr_2FeO_4 . Поэтому описанные ранее реакции (2) и (6) восстановления хромита железа приобретают следующий вид:

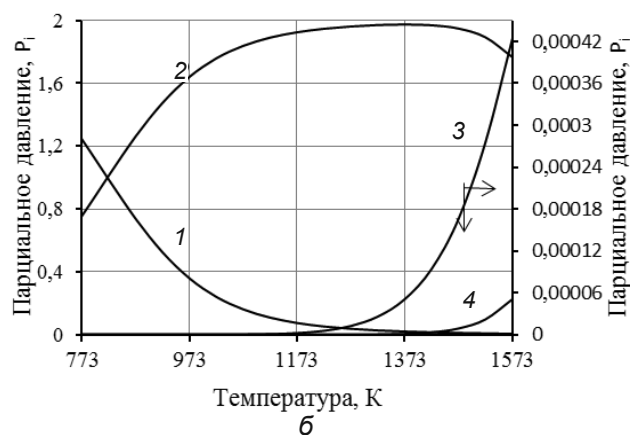
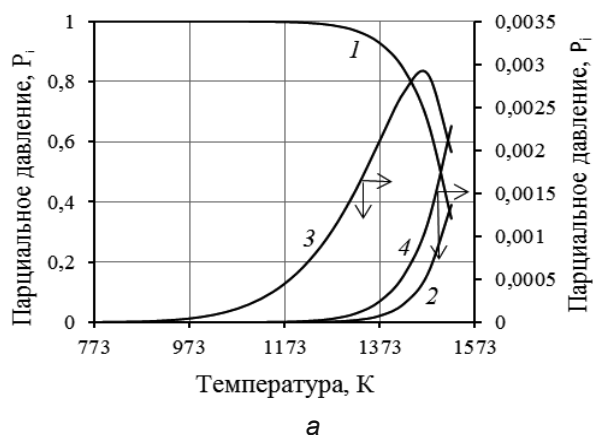


Рис. 3. Равновесный состав газовой фазы восстановления хромита железа метаном на этапе $Cr_2FeO_4 \rightarrow Cr_3C_2 + Fe_3C$ при а) $T = \text{const}, P_{\Sigma} = 1$ и б) $T = \text{const}, P_{\Sigma} = 2$, где: 1 — CH_4 ; 2 — H_2 ; 3 — H_2O ; 4 — CO

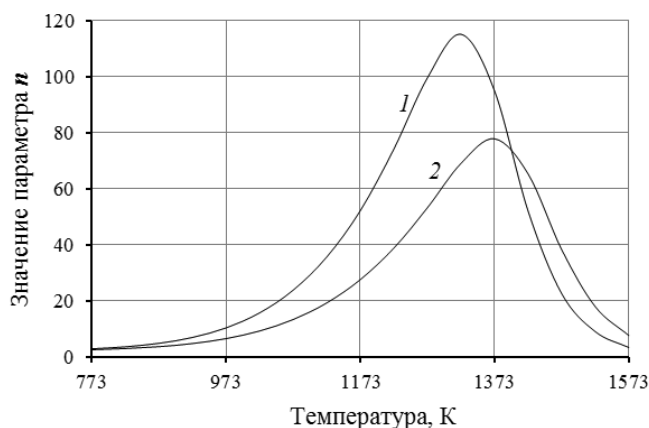
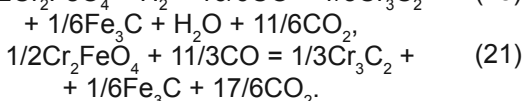
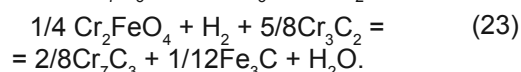
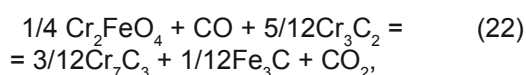


Рис. 4. Значение параметра n для первого этапа восстановления хромита железа метаном: 1 – $P_{\Sigma} = 1$; 2 – $P_{\Sigma} = 2$

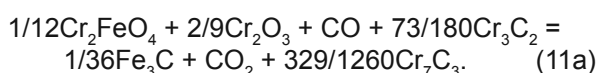


В рассматриваемом диапазоне температур анализируемая система имеет 3 степени свободы, и равновесный состав газовой фазы функционально зависит от T , P_{Σ} и n . Расчет равновесного состава газовой фазы для рассматриваемого варианта, по приведенной схеме, весьма сложный, так как выражения для констант равновесия реакций (15) и (21) имеют дробные показатели степени, и в данной работе расчет не выполнялся.

На втором этапе рассматриваемого процесса $\text{Cr}_2\text{FeO}_4 \rightarrow \text{Cr}_7\text{C}_3 + \text{Fe}_3\text{C}$ в качестве твердого восстановителя выступает карбид Cr_3C_2 . Началу возможной газификации его за счет CO_2 и H_2O отвечает развитие реакций (10) и ранее приведенной (5). Они служат фундаментом для звеньев газового восстановления:



Однако использование реакции в такой записи может не соответствовать реальной картине процесса, так как на первом этапе происходит восстановление в основном железа, и невосстановленным может оставаться $\text{Cr}_2\text{FeO}_4 + \text{Cr}_2\text{O}_3$. Если принять соотношение по кислороду между Cr_2FeO_4 и Cr_2O_3 , равное 2, то уравнение (11) принимает вид:



Таким образом, конечная форма записи реакций (11) и (12), при $\text{C}/\text{H}_2 = \text{const}$, определяется величиной отклонения от стехиометрии, а также составом образующейся карбидной фазы. В рамках данной работы эти особенности не учитывались.

Для расчета равновесного состава газовой фазы второго этапа восстановления хромита железа метаном, при $T \leq T_p$, были использованы реакции 11, 12 (либо 11a) совместно с (10) и (5). Система пятикомпонентная, содержит пять фаз и имеет две степени свободы (аналогично как для первого этапа). В систе-

ме отсутствует метан, так как реакция (1) протекает до конца, учитывая полное расходование углерода по реакции (2) и (6) и переходом функции углеродистого восстановителя к карбиду Cr_3C_2 . Газовая фаза состоит из H_2 , CO , H_2O и CO_2 и для расчета используем систему четырех уравнений, решение которой совместно с $P_{\Sigma} + P_{\text{CO}} + P_{\text{CO}_2} + P_{\text{H}_2} + P_{\text{H}_2\text{O}}$ позволяет получить численные значения парциальных давлений компонентов газовой фазы и рассчитать параметр n :

$$K_{12} = \frac{P_{\text{H}_2\text{O}}}{P_{\text{H}_2}}; K_{11} = \frac{P_{\text{CO}_2}}{P_{\text{CO}}}; K_{10} = \frac{P_{\text{CO}}^2}{P_{\text{CO}_2}}; K_5 = \frac{P_{\text{H}_2} \cdot P_{\text{CO}_2}}{P_{\text{H}_2\text{O}} \cdot P_{\text{CO}}}.$$

При выборе в качестве независимых параметров T , P_{Σ} выражения для расчета равновесных парциальных давлений газов имеют вид:

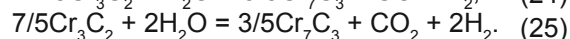
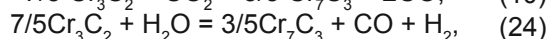
$$P_{\text{CO}} = K_5 \cdot K_{10} \cdot K_{12}; P_{\text{CO}_2} = K_5 \cdot K_{10} \cdot K_{12} \cdot K_{11};$$

$$P_{\text{H}_2} = \frac{P_{\Sigma} - (K_5 \cdot K_{10} \cdot K_{12}) - (K_5 \cdot K_{10} \cdot K_{12} \cdot K_{11})}{(1 + K_{12})};$$

$$P_{\text{H}_2\text{O}} = P_{\text{H}_2} \cdot K_{12}.$$

Полученные данные, а также значение параметра n представлены на рис. 5 и 6. При превышении температуры над T_p карбид термодинамически неустойчив, и расчет равновесного состава газовой фазы выполняется аналогично, как и для первого этапа.

На втором этапе восстановления из выбранных авторами статьи реакций (5), (10), (11) и (12) только звено газификации карбида приводят к изменению параметра n по реакциям:



При температурах второго этапа термодинамически более предпочтительна реакция (10), которая увеличивает долю углеродсодержащих газов, что приводит к уменьшению параметра n (рис. 5). Данные о равновесном составе газовой фазы (рис. 5) также указывают на возрастание доли CO и CO_2 , при снижении доли H_2 и H_2O . Снижение парциального давления H_2O при $T > 1463\text{K}$ (рис. 5) можно объяснить возрастанием доли водяного пара в процессе газификации, однако, оно сопровождается и дальнейшим снижением P_{H_2} , что связано с участием водорода в восстановлений. В целом же снижение параметра n свидетельствует о том, что анализируемая система смещается в сторону углеродотермии, для которой $n = 0$.

Реализация процесса на последующих этапах требует высоких температур, что может приводить к появлению жидких фаз, и в рамках данной работы не исследовалась.

Выводы

Таким образом, выполнен термодинамический анализ восстановления хромита железа метаном.

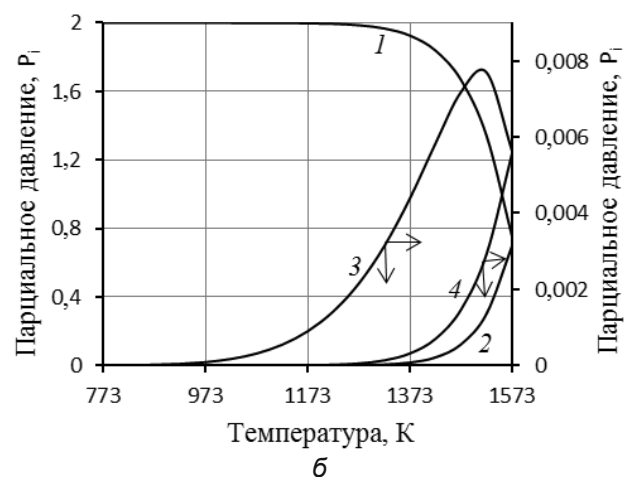
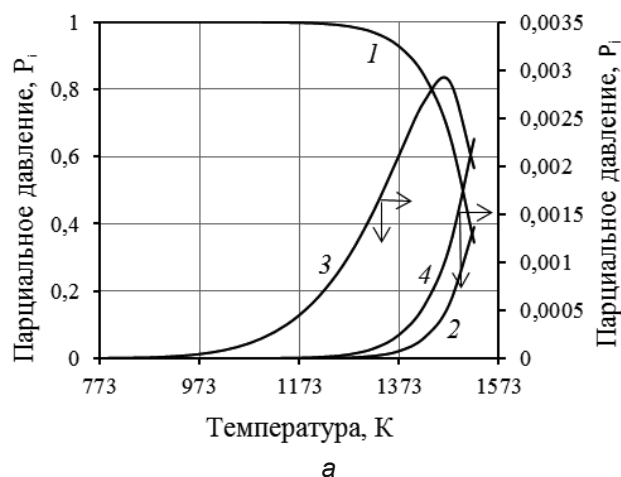


Рис. 5. Равновесный состав газовой фазы восстановления хромита железа метаном на этапе $\text{Cr}_2\text{FeO}_4 \rightarrow \text{Cr}_3\text{C}_2 + \text{Fe}_3\text{C}$ при а) $T = \text{const}$, $P_\Sigma = 1$ и б) $T = \text{const}$, $P_\Sigma = 2$; 1 – H_2 , 2 – CO , 3 – H_2O , 4 – CO_2

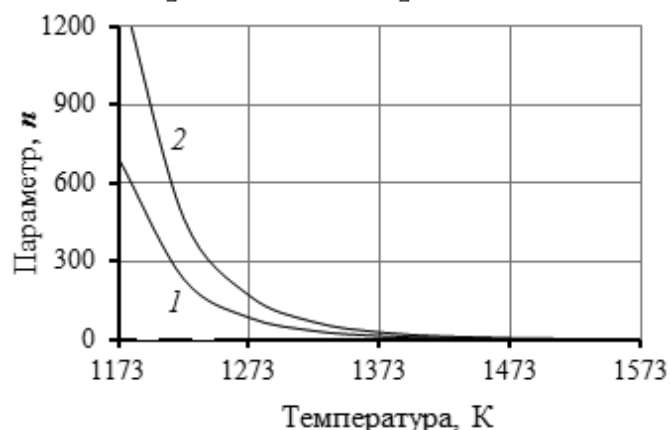
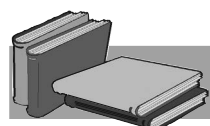


Рис. 6. Значение параметра n для второго этапа восстановления хромита железа метаном: 1 – $P_\Sigma = 1$; 2 – $P_\Sigma = 2$

Рассчитаны температуры начала восстановления и равновесный состав газовой фазы на первом и втором этапах восстановления. Показано, что восстановление хромита железа термодинамически более вероятно через предварительную конверсию метана. Восстановление смесями ($\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O}$) и ($\text{CH}_4 + \text{CO}_2$) более предпочтительно, чем чистым метаном. Выполнено термодинамическое моделирование указанных систем, рассчитан состав газа и изменение параметра n для первого и второго этапов восстановления хромита железа.

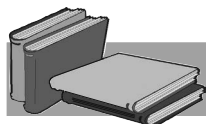
В заключение следует отметить, что полученные результаты свидетельствуют о наличии термодинамических предпосылок комплексного восстановления хромита железа с участием неконвертированного природного газа.



ЛИТЕРАТУРА

- Острик П.Н., Гасик М.М., Пирог В.Д. Металлургия губчатых и порошковых лигатур. – К.: Техніка, 1992. – 128 с.
- Григорьев С.М., Петрищев А.С., Ковалев А.М. Губчатые и плавные лигатуры из рудного и техногенного сырья. – Запорожье: Запорожский национальный университет, 2013. – 306 с.
- Веселов В.В., Дорохович В.П. Взаимодействие метана с окислами металлов // Журнал прикладной химии. – 1965. – Т. XXXVIII. – Вып. 10. – С. 2292–2298.
- Меликов К.В., Пишванов В.А., Демиденко Ш.Н. Изучение нагрева природного газа в трубах из нержавеющей стали // Газовая промышленность. – 1969. – № 2. – С. 37–40.
- Сенин А.В. Твердофазное восстановление хромовой руды метаном // Электromеталлургия. – 2013. – № 1. – С. 31–37.
- Симонов В.К., Гришин А.М. Термодинамический анализ газовой-углеродной системы восстановления Cr_2O_3 в твердых фазах с участием метана // Электromеталлургия. – 2016. – № 1. – С. 40–44.
- Усачев Н.Я., Харламов В.В., Беланова Е.П., Старостина Т.С., Круковский И.М. Окислительная переработка низших алканов: состояние и перспективы // Российский химический журнал (Журнал российского химического общества имени Д.И. Менделеева). – 2008. – Т. LII. – С. 22–31.
- Дорохович В.П. Исследование кинетики восстановления окислов металлов семейства железа метаном. Дис. канд. хим. наук. – Киев: Ин-т газа АН УССР, 1969.
- Нетребко В.В. К вопросу образования карбидов Fe_3C и Fe_7C_3 в высокохромистых чугунах // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту. – 2016. – № 3 (63). – С. 138–144.

Поступила 11.01.2019



REFERENCES

1. Ostriuk, P.N., Gasik, M.M., Pirog, V.D. (1992). Metallurgy of sponge and powder ligatures. Kyiv: Tekhnika, 128 p. [in Russian].
2. Grigor'ev, S.M., Petrishchev, A.S., Kovalev, A.M. (2013). Sponge and fused alloys from ore and technogenic materials. Zaporozh'e: Zaporozhskiy natsionalnyi universitet, 306 p. [in Russian].
3. Veselov, V.V., Dorokhov, V.P. (1965). The interaction of methane with oxides of metals. *Zhurnal prikladnoi khimii. Journal of Applied Chemistry*, Vol. XXXVIII, no. 10, pp. 2292–2298 [in Russian].
4. Melikov, K.V., Pishvanov, V.A., Demidenko, Sh.N. (1969). Study of heating of natural gas in pipes from stainless steel. *Gazovaia promyshlennost'. Gas industry*, no. 2, pp. 37–40 [in Russian].
5. Senin, A.V. (2013). Solid phase reduction of chrome ore with methane. *Elektrometallurgiya. Electrometallurgy*, no. 1, pp. 31–37 [in Russian].
6. Simonov, V.K., Grishin, A.M. (2016). Thermodynamic analysis of gas-coal-thermal reduction of Cr_2O_3 in solid phases with the participation of methane. *Elektrometallurgiya. Electrometallurgy*, no. 1, pp. 40–44 [in Russian].
7. Usachev, N.Ya., Kharlamov, V.V., Belanova, E.P., Starostina, T.S., Krukovskij, I.M. (2008). Oxidizing processing of more subzero alkanes: the state and prospects. *Rossiiskii khimicheskii zhurnal (Zhurnal rossiiskogo khimicheskogo obshchestva im. D.I. Mendeleeva. Russian Chemical Journal (Journal of the Russian Chemical Society named after D.I. Mendeleev))*, Vol. LII, pp. 22–31 [in Russian].
8. Dorokhov, V.P. (1969). Research of kinetics of renewal of oxides of metals of family of iron by methane. Extended abstract of candidate's thesis. Kiev: Institut gaza AN USSR [in Russian].
9. Netrebko, V.V. (2016). To the question of formation of carbides of Fe_3C and Fe_7C_3 in high-chromium cast irons. *Nauka ta prohres transportu. Visnyk Dnipropetrovs'koho natsional'noho universytetu zaliznychnoho transportu. Science and progress of transport. Bulletin of the Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, no. 3 (63), pp. 138–144 [in Russian].

Received 11.01.2019

Анотація

О.М. Гришин, канд. техн. наук, доц., доц. кафедри теорії металургійних процесів та хімії, e-mail: hryshyn@i.ua; **А.А. Надточій**, канд. техн. наук, доц., доц. кафедри теорії металургійних процесів та хімії, e-mail: Nadtochiy08@ukr.net ; **В.О. Петренко**, д-р техн. наук, проф., проф. кафедри інтелектуальної власності, e-mail: petrenko_v@email.ua

Національна металургійна академія України (НМетАУ), Дніпро, Україна

Фізико-хімічний аналіз комплексного відновлення Cr_2FeO_4 за участю метану

В роботі представлено результати термодинамічного аналізу комплексного відновлення хроміту заліза за участю метану при температурах, що виключають розплавлення шихти. Розглянуто деякі можливі фізико-хімічні моделі відновлення. Термодинамічно більш ймовірний процес відновлення хроміту заліза метаном без диспропорціонування (при T вище 800 K). Відновлення хроміту сумішами ($\text{CH}_4 + \text{CO}_2$) і ($\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O}$) сприяє розвитку конверсії CH_4 при наявності каталітичної поверхні, якою може виступати $\text{Fe}_{\text{мет}}$. Зроблено висновок про термодинамічну перевагу реакцій конверсії метану при температурі вище ~ 953 K, тобто в області відновлення хроміту заліза. За запропонованою методикою виконано розрахунок температури початку відновлення Cr_2FeO_4 метаном на першому і другому етапах відновлення. Розрахований рівноважний склад газової фази для реакції відновлення хроміту метаном у разі нестачі співвідношення вуглець- і воденьвмісних газів (параметр n). На параметр n впливають два протилежні процеси – реакція газифікації вуглецю, яка призводить до зменшення параметра n , і розпад метану, який сприяє збільшенню вмісту воденьвмісних газів. Запропоновано методику та виконано розрахунок параметра n для відновлення хроміту заліза метаном, за отриманими даними побудовано температурні залежності параметра n для першого і другого етапів відновлення хроміту за умови стехіометричного співвідношення $(\text{C} + \text{H}_2)/\text{O}$. При дефіциті вуглецю реалізується більш складна схема, яка характеризується різним ступенем завершення процесу в залежності від співвідношення C/O . Виконано термодинамічне моделювання системи Cr-Fe-C-O-H для варіантів відновлення хроміту заліза сумішами метану з водяною парою і діоксидом вуглецю. Показано, що рівноважна газова фаза при $T > 1173$ K має високий відновлювальний потенціал, що дає можливість використовувати газ, що відходить, в технологічному процесі. Підтверджено принципово можливу схему організації процесу з використанням неконвертованого природного газу.

Ключові слова

Хроміт заліза, природний газ, комплексне відновлення, карбід хрому, термодинамічне моделювання.

A.M. Grishin, Candidate of Engineering Sciences, Docent, Associate Professor at the Department of Theory of Metallurgical Processes and Chemistry, e-mail: hryshyn@i.ua; **A.A. Nadtochij**, Candidate of Engineering Sciences, Docent, Associate Professor at the Department of Theory of Metallurgical Processes and Chemistry, e-mail: Nadtochiy08@ukr.net; **V.A. Petrenko**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Professor at the Department of Intellectual Property, e-mail: petrenko_v@email.ua

National Metallurgical Academy of Ukraine (NMetAU), Dnipro, Ukraine

Physical and chemical analysis of complex restoration of Cr_2FeO_4 with participation of methane

The paper presents the results of a thermodynamic analysis of the complex reduction of iron chromite with the participation of methane at temperatures precluding the charge melting. Some possible physicochemical recovery models are considered. The process of iron chromite reduction by methane without disproportionation is more likely thermodynamically (at T above 800 K). Reduction of chromite with mixtures ($\text{CH}_4 + \text{CO}_2$) and ($\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O}$) contributes to the development of the conversion of CH_4 in the presence of a catalytic surface, which can be Fe_{mel} . It was concluded that the thermodynamic preference is given to methane conversion reactions at temperatures above ~ 953 K, that is, in the reduction of iron chromite. According to the proposed method, the temperature of the onset of the reduction of Cr_2FeO_4 by methane was calculated at the first and second stages of the reduction. The equilibrium composition of the gas phase is calculated for the reduction of chromite by methane in the case of inconstancy of the ratio of carbon and hydrogen containing gases (parameter n). Parameter n is influenced by two opposite processes – by carbon gasification reaction, which leads to a decrease in parameter n , and methane decomposition, which increases the content of hydrogen-containing gases. A method is proposed and the parameter n is calculated to reduce iron chromite by methane, according to the data obtained, the temperature dependences of the parameter n were constructed for the first and second stages of chromite reduction under the condition of the stoichiometric ratio $(\text{C} + \text{H}_2)/\text{O}$. With carbon deficiency, a more complex scheme is used, which is characterized by varying degrees of process completion depending on the C/O ratio. Thermodynamic modeling of the Cr-Fe-C-O-H system was performed for the variants of reducing chromite of iron with methane mixtures with water vapor and carbon dioxide. It is shown that the equilibrium gas phase at $T > 1173\text{K}$ has a high reduction potential, which makes it possible to use the exhaust gas in the process. A fundamentally possible scheme of organization of the process using non-converted natural gas has been confirmed.

Iron chromite, natural gas, complex reduction, chromium carbide, thermodynamic modeling.

С.Н. Писарский¹, инженер машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ), e-mail: serge.pisarsky@gmail.com

А.Н. Смирнов², д-р техн. наук, проф., вед. науч. сотр., e-mail: stalevoz@i.ua

¹Standart Metallurgical Company, Лагос, Нигерия

²Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев, Украина

Исследование современных представлений о природе формирования отложений в огнеупорах при разливке стали. Сообщение 1

При исследовании явления формирования отложений теоретический анализ его физико-химической природы и закономерностей, наряду с поиском мер противодействия, всегда рассматривался в качестве приоритетного направления. Однако ряд принципиальных вопросов, связанных с этим явлением, продолжает до сих пор оставаться предметом научных дискуссий. Выполненное аналитическое исследование известных на сегодня представлений о механизмах (моделях) формирования отложений показало: отсутствие полной ясности в понимании роли ряда факторов; отсутствие детализации по ряду важных аспектов рассматриваемого явления; несоответствие некоторых базовых представлений по процессам, сопровождающих формирование отложений, известным положениям физики и химии.

На основании термодинамического анализа процесса адсорбции поверхностно-активного в железе кислорода показано, что получившее заметное распространение представление об интенсивном движении включений в градиентных (диффузионных) полях концентрации кислорода на межфазной границе «металл-огнеупор (массив отложений)» применительно к фактическим условиям разливки является в большинстве возможных случаев некорректным.

В ходе сравнительного морфологического анализа включений, присутствующих в стали и в отложениях, показано, что сходство терминологии в определении морфологических типов для них не означает их идентичность. Отличия в морфологии и химическом составе сравниваемых включений указывают на то, что формирование отложений не всегда связано с осаждением на поверхность огнеупоров присутствующих в стали продуктов раскисления.

На основании результатов выполненных аналитических исследований сделан предварительный вывод о необходимости разработки, в дополнение к существующим, новой модели этого явления. Отличаясь универсальным характером, она должна распространяться на огнеупоры любого состава и на все этапы формирования отложений.

Ключевые слова: разливка стали, формирование отложений, огнеупоры, природа и закономерности явления, модельные представления, базовый механизм.

Формирование отложений (clogging) в разливочных огнеупорах, в том числе стаканах-дозаторах, стопорах, шиберных затворах, погружных стаканах при разливке стали является серьезной технологической проблемой для сталеплавильного производства. Она приводит к снижению скорости разливки, преждевременной замене погружных стаканов или вынужденному прекращению разливки на ручье, снижению серийности разливки, производительности МНЛЗ и, в конечном счете, к росту затрат на его производство [1, 2]. Немаловажным аспектом данной проблемы является также ухудшение качества стали, обусловленное присутствием в ней модифицированных продуктов раскисления из-за обработки стали Са-содержащими материалами для улучшения ее разливаемости. Известно, например, что присутствие в стали коррозионно-активных неметаллических включений (КАНВ), к которым относятся алюминаты кальция, может приводить к заметному росту скорости локальной коррозии изделий из нее. В частности, для нефтепроводных труб она увеличивается с традиционного уровня в десятки доли миллиметра до десятков миллиметров в год, являясь основной причиной резкого снижения периода безаварийной эксплуата-

ции трубопроводных систем [3]. Поэтому исследования, направленные на более глубокое понимание природы формирования отложений в процессе разливки, и создание на этой основе таких технологических решений в сталеплавильном производстве, которые не оказывают столь пагубное влияние на качество стали, представляют практический интерес.

На протяжении последних 30–40 лет в результате многочисленных исследований по проблеме отложений была накоплена внушительная база знаний по самым различным аспектам рассматриваемой проблемы, и сформировались определенные представления о природе и закономерностях рассматриваемого явления. Были определены факторы, в том числе производственные и технологические, которые ускоряют или тормозят этот нежелательный процесс, а также предложен комплекс мероприятий, снижающих остроту проблемы. Следует отметить, что в ходе проводимых исследований рассматриваемого явления теоретический анализ его природы и закономерностей, наряду с поиском мер противодействия, всегда рассматривался в качестве приоритетного направления. Так, например, одна из целей исследований, выполненных представительной командой

европейских исследователей, была сформулирована как «генерирование новых фундаментальных знаний по физическим и химическим явлениям процесса формирования отложений» [4]. Тем не менее, ряд принципиальных вопросов, связанных с данным явлением, продолжает до сих пор оставаться предметом научных дискуссий [5].

Проблема отложений характерна для разливки всех марок стали, раскисленной алюминием и другими сильными раскислителями. Скорость роста отложений увеличивается с ростом содержаний в стали кислоторастворимого алюминия и общего кислорода, а также при снижении содержания в ней углерода [1, 4, 5]. В последнем случае это связано с повышением равновесного содержания в ней растворенного кислорода. Присутствие в стали растворенного кислорода, в том числе внесенного в нее вследствие вторичного окисления, рассматривается, как будет показано ниже, в качестве важнейшего компонента механизма транспортировки включений к поверхности огнеупора (отложений). Формирование отложений наблюдается при использовании огнеупоров самого различного состава – оксид-углеродных (корундографит, периклазоуглерод, цирконографит), оксидных (корунд, кварц, периклаз, диоксид циркония), а также огнеупоров на основе тугоплавких безкислородных соединений (BN, AlN, SiC, ZrB₂, SiAlON Si₂ON₂, Si₃N₄, B₄C и др.) [6]. Использование последних в качестве антиклоггинговых покрытий позволяет заметно уменьшить скорость формирования отложений и, как следствие, увеличить длительность разливки через погружной стакан. Для оксид-углеродных огнеупоров скорость формирования отложений на начальном этапе несколько выше, чем для чисто оксидных, но в целом влияние состава огнеупора на процесс формирования отложений отсутствует или незначительно [4, 5, 7]. Скорость формирования отложений зависит от теплопроводности огнеупоров – с ее ростом она увеличивается. Считается, что определенную роль в процессах формирования отложений играет затвердевание стали в неметаллической матрице.

В проблеме отложений существует ряд «трудных» вопросов, на которые из-за недостаточно глубокого понимания протекающих физико-химических процессов получить однозначные ответы не представляется возможным. Одним из них является вопрос о роли турбулентности в формировании отложений. Известно, что при ламинарном режиме течения потоков металла у поверхности огнеупоров, например футеровки сталеразливочных и промежуточных ковшей, отложения на них не образуются. Обязательным условием для этого является турбулентный режим обтекания поверхности огнеупора [5]. При этом скорость роста отложений пропорциональна осредненной кинетической энергии турбулентности [4, с. 79].

Из сталеплавильной практики известно также, что скорость коагуляции включений пропорциональна интенсивности перемешивания расплава. Но, согласно выполненного оценивания, уже при скорости потоков $\geq 1,4$ м/с сцепление между включениями может быть нарушено из-за воздействия на них турбулентных пульсаций скорости [8, с. 160]. В этой связи следует

отметить, что скорости потоков в стаканах-дозаторах промковшей сортовых МНЛЗ достигают 4–5 м/с, но это не препятствует, а, наоборот, способствует формированию в них отложений. Кроме того, с ростом турбулентности потока уменьшается толщина ламинарного гидродинамического и диффузионного пограничных слоев, которым отводится заметная роль в процессах осаждения включений на поверхность огнеупора [7; 2, с. 39–40]. Можно также отметить, что на заметную роль фактора гидродинамики в формировании отложений указывает тот факт, что состав и морфология включений в отложениях зависят от места их расположения в погружном стакане, которое определяет параметры турбулентности потока [4, 5].

Механизм образования металлической фазы в составе отложений интегрирован в механизм формирования отложений и является на сегодня также предметом дискуссий. Объем металлической фазы в виде капель, имеющих размеры в диапазоне 10^{-2} – 10^{-4} м, в общем объеме отложений может колебаться в значительных пределах и составлять 35–75 % [2, с. 46]. Наиболее распространенным является представление о тепловой природе образования металлической фазы в отложениях [1, 9], но ряд исследователей считает ее физико-химической [10]. Уточнение природы и закономерностей этого явления может стать ключевым моментом в понимании природы формирования отложений в целом.

В рамках существующих представлений по рассматриваемой проблеме отсутствует и объяснение того факта, что неметаллические включения, присутствующие в составе отложений, представлены не пропорционально их содержанию в стали. Основными компонентами отложений, как известно, являются оксиды алюминия Al₂O₃ и железа FeO [2, с. 46], в то время как самую большую группу включений в стали составляют силикаты.

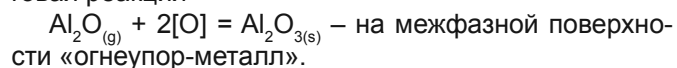
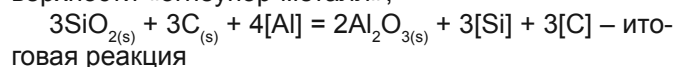
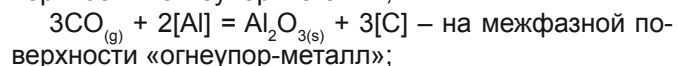
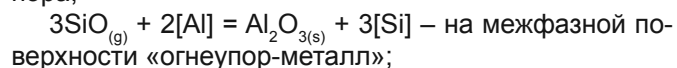
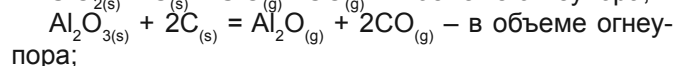
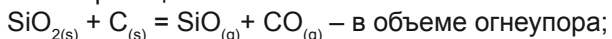
Открытым остается и вопрос о причинах заметного снижения скорости формирования отложений на бескислородных огнеупорах. В рамках существующих представлений в качестве возможных причин этого рассматриваются следующие:

- образование жидкой пленки на межфазной границе, например из оксида бора – при использовании бор-содержащих материалов (BN, ZrB₂);
- снижение шероховатости поверхности огнеупора;
- уменьшение теплопроводности материала;
- ухудшение смачиваемости таких огнеупоров сталью;
- пониженная реакционная способность компонентов огнеупора;
- уменьшение воздухопроницаемости огнеупора.

Исследования фазового состава поверхностного слоя отложений, который непосредственно контактирует с огнеупором, показали, что он зависит не только от химического состава стали и содержания в ней сильных раскислителей, но и от состава огнеупора. Установленная зонная структура отложений с наличием нескольких характерных слоев отложений, имеющих определенные различия и особенности, связывается с действием на разных этапах их формирования различных механизмов. Для описания

процессов формирования отложений по этой причине в настоящее время используются различные модели [1, 4, 5, 7, 9, 11].

Считается, что на первом этапе в результате взаимодействия стали с SiO_2 и C из состава огнеупора происходит образование субоксидов алюминия Al_2O , кремния SiO , а также CO, которые диффундируют к поверхности раздела фаз «огнеупор-металл». Здесь они вступают в реакцию с растворенным в металле алюминием и образуют осаждающиеся на поверхность огнеупора алюминаты [4, 5, 7, 9]. Ниже представлены реакции 1-го этапа:



Толщина 1-го слоя из отложений высокой плотности может достигать 1–2 мм [5, 11]. Можно отметить, что положения этой «термохимической» модели 1-го этапа экспериментально подтверждены в ходе специальных исследований взаимодействия оксид-углеродных огнеупоров с железоуглеродистым расплавом [7]. В них для идентификации фазового состава включений, образовавшихся в объеме, примыкающем к межфазной границе «огнеупор-металл», параллельно использовались катодо-люминисцентный (CLM) и поляризационный (RLM) микроскопы.

Некоторые исследователи полагают, что на границе «огнеупор-металл» имеет место высокотемпературная диссоциация оксидов, обуславливающая присутствие на ней кислорода, находящегося в равновесии с огнеупором и вступающего в реакцию с растворенным в металле алюминием. Эта гипотеза экспериментального подтверждения не нашла [5, 7].

Ряд исследователей считает, что главной причиной как зарождения богатого оксидами железа мелкодисперсного слоя на поверхности огнеупора, так и последующего формирования отложений из продуктов взаимодействия растворенного кислорода с алюминием, кальцием и другими раскислителями, присутствующими в стали, является сверхравновесное содержание кислорода в стали, обусловленное ее вторичным окислением и снижением температуры при разливке. Отмечается, что механизм формирования отложений по этой модели напоминает выделение из пересыщенных растворов избыточной фазы в виде кристаллических продуктов этого взаимодействия, которые растут поперек струи. При этом на поверхности раздела фаз наблюдается формирование вязкого контактного слоя, адгезия которого к огнеупору больше, чем к стали [10].

Считается, что главную роль в формировании основного массива отложений, представленного рыхлыми структурами, содержащими металлическую фазу, играет осаждение присутствующих в стали ту-

гоплавких окисных фаз (продуктов раскисления, модифицирования, вторичного окисления, экзогенных включений различной природы) и сульфидов CaS на поверхность огнеупора или отложений. Существует несколько моделей, описывающих механизм транспортировки включений к поверхности раздела фаз, в том числе за счет: 1) турбулентных вихрей, преимущественно минимального масштаба; 2) турбулентных пульсаций скорости, направленных перпендикулярно поверхности огнеупора; 3) реактивной силы, возникающей в градиентных полях концентрации поверхностно активного (ПА) в расплаве железа кислорода; 4) результирующей силы, действующей на включение в криволинейных потоках (при огибании потоком внешних или внутренних углов огнеупора) и др. [1, 4, 5, 7]. Турбулентные вихри или пульсации скорости переносят включения из турбулентного ядра потока в ламинарный пограничный слой, где они не подвержены динамическому воздействию со стороны потока и могут беспрепятственно прикрепляться к поверхности раздела фаз [2, 5]. Вместе с тем, сторонники этой гипотезы критически отмечают, что величина пульсаций скорости в любой точке потока одинакова по всем направлениям и, как следствие, не имеет определенного результирующего вектора. Следует также отметить, что влияние толщины вязкого ламинарного слоя на формирование отложений различными исследователями трактуется по-разному. В отношении сил, действующих на включения в криволинейных потоках, в качестве критического замечания можно отметить противоречивость выводов по динамике у разных исследователей. В частности, утверждается, что при обтекании потоками как внешних, так и внутренних углов огнеупоров, движение включений направлено к поверхности огнеупора [4].

В отношении градиента концентрации ПА в железе кислорода предполагается, что он формируется в ламинарном диффузионном пограничном слое расплава, примыкающем к поверхности огнеупора. Возникающая в этом градиентном поле концентрации ПА кислорода реактивная сила действует непосредственно на включение и направлена в сторону увеличения концентрации кислорода, то есть к поверхности раздела фаз [4, 8, с. 165]. Согласно расчетов [1, 9], даже незначительный градиент концентрации кислорода, возникающий в диффузионном слое при вторичном окислении, например, соответствующем повышению содержания азота в стали всего на 0,3 ppm, приводит к появлению силы, вызывающей движение оксидного включения размером 10 мкм со скоростью 0,9 м/с. Это положение, по мнению многих исследователей, лежит в основе главного механизма, ответственного за быстрое перемещение имеющихся в стали включений к поверхности огнеупора в областях аспирации и за пределами зон рециркуляции потоков. Считается также, что создание этого диффузионного слоя с градиентом концентрации ПА-компонента может происходить на 1-ом этапе формирования отложений в результате образования газообразных субоксидов (SiO , Al_2O) и CO. Последующее прикрепление включений к поверхности раздела фаз сопровождается снижением поверхностной энергии системы как из-за снижения

площади межфазной поверхности системы «металл-включение», так и вследствие уменьшения межфазного натяжения на границе «включение-огнеупор» ($\sigma_{\text{ме-вкл}} > \sigma_{\text{вкл-огн}}$). После прикрепления включения к поверхности огнеупора или слоя отложений происходит его спекание с ними. Ряд исследователей считает, что в реальности механизм транспортировки включений к межфазной поверхности может отличаться от описанного. Для включений, не являющихся продуктами раскисления, он предполагается более простым, для продуктов раскисления – более сложным [1].

Из существующих представлений о природе формирования отложений при разливке следует, что самым очевидным средством борьбы с ними является повышение чистоты стали от продуктов раскисления и модифицирования, а также защита ее от вторичного окисления в процессе разливки [1, 9]. Однако, как показали результаты специальных исследований, изменение доли Al_2O_3 -содержащих включений в их общей массе, то есть изменение степени чистоты стали по этим включениям, практически не влияет на интенсивность формирования отложений [4, с. 18; 11]. Как указывалось выше, она заметно возрастает лишь с ростом содержания в стали общего и растворенного кислорода, а также кислоторастворимого алюминия. Выполненные разными исследователями оценки количества переходящих в отложения кристаллических оксидов от содержащихся в разливаемой стали имеют большой разброс – от 0,57 до 16 %, что может указывать на отсутствие заметной корреляции интенсивности формирования отложений от чистоты стали по Al_2O_3 -содержащим включениям, а также на заметные различия в условиях производства и используемых технологиях (технология раскисления, вид футеровки стальной ванны, интенсивность и длительность продувки стали, наличие вакуумирования и т. д.) [5, 9]. Достаточно важными в этом плане представляются результаты сравнительных исследований морфологии включений, присутствующих в стали и в отложениях. Они позволили прийти к однозначному выводу о том, что отложения на поверхности разливочных огнеупоров не являются результатом осаждения на ней продуктов раскисления, присутствующих в стали перед разливкой [11].

Вторичное окисление, в том числе обусловленное газопроницаемостью огнеупоров, по оценке ряда исследователей, также не является значимым фактором в формировании отложений [1, 4, 5]. Например, было определено, что при разливке на 2 ручья МНЛЗ двух плавок массой по 250 т каждая при содержании в стали общего кислорода $[\text{O}]_{\text{total}} = 30 \text{ ppm}$ и интенсивности вторичного окисления, соответствующей уровню поглощения азота в 5 ppm, масса Al_2O_3 , присутствующего в составе отложений в погружных стаканах, составила 5,1 кг, а образующегося вследствие вторичного окисления – всего 1,4 кг. В этой связи отмечается, что для уменьшения вероятности осаждения включений на поверхности огнеупора гораздо важнее уменьшать не их количество (присутствующих в стали и образующихся при ее вторичном окислении), а интенсивность их взаимодействия с огнеупором [9].

Если же предположить, что при вторичном окислении стали решающее значение имеет не столько количество дополнительно образующихся оксидов, сколько возникновение упомянутого выше диффузионного слоя с градиентом концентрации ПА кислорода и движение в нем оксидных включений к межфазной поверхности [4, 9], то, очевидно, что для использования этого известного в физике эффекта в рассматриваемых условиях необходимо, как минимум, рассмотреть соответствующее обоснование. Поскольку в литературе оно, насколько нам известно, до сих пор не представлено, рассмотрим этот вопрос более углубленно.

Известно, что процесс адсорбции в растворах протекает благодаря снижению свободной поверхностной энергии дисперсной системы G^s в процессе самопроизвольного перераспределения компонентов между поверхностным слоем и объемом раствора: $\Delta G^s = s \cdot \Delta \sigma$, где s – площадь поверхности раздела фаз, $\Delta \sigma$ – снижение поверхностного натяжения. В результате при равновесии системы состав объемной фазы и поверхностного слоя различен – последний оказывается обогащенным тем компонентом, переход которого из объема раствора на межфазную поверхность энергетически выгоден. При этом молекулы растворенного вещества в поверхностном слое находятся в поле действия поверхностных сил и имеют иное энергетическое состояние, чем в объеме раствора, а его стандартные химические потенциалы в поверхностном слое μ_s^0 и в объеме μ_v^0 не равны. Для поверхностно активных веществ $\mu_s^0 < \mu_v^0$. Разность их значений представляет собой адсорбционный потенциал $W_a^0 = -\Delta G^0 = -(\mu_s^0 - \mu_v^0)$, который численно равен работе изотермического процесса переноса одного моля поверхностно активного компонента из объема раствора на границу раздела фаз в стандартных условиях [12].

Поскольку с термодинамической точки зрения адсорбция в растворе представляет процесс выравнивания химических потенциалов каждого компонента гетерогенной системы в поверхностном слое μ_s и объеме μ_v , то для условий равновесия между ними для каждого компонента имеем $\mu_s = \mu_v$. Учитывая, что $\mu_s = \mu_s^0 + RT \ln a_s$, а $\mu_v = \mu_v^0 + RT \ln a_v$, получим: где K_f – константа распределения Генри, не зависящая от концентрации; a – активность компонента в растворе.

$$\frac{a_s}{a_v} = \exp\left(-\frac{\mu_s^0 - \mu_v^0}{RT}\right) = K_f,$$

Для разбавленных растворов можно пренебречь коэффициентом активности $\gamma = a/c$ и перейти от активностей к соответствующим концентрациям c_s и c_v . Для поверхностно активного компонента в растворе получим $c_s > c_v$. Следовательно, равновесие в системе достигается только за счет самопроизвольного перераспределения ПА компонента между объемом и поверхностным слоем до выравнивания значений μ_s и μ_v . Обратный переход вещества в условиях равновесия невозможен, так как для этого процесса $\Delta G^0 > 0$.

Следует особо подчеркнуть, что адсорбция вещества из растворов сопровождается образованием на межфазной границе исключительно мономолекулярного слоя. Для рассматриваемой задачи его толщина составляет несколько Ангстрем, что на 4 порядка меньше размера присутствующих в стали включений.

Таким образом, повышенная концентрация кислорода в адсорбционном слое расплава, граничащем с огнеупором или массивом отложений, не создает условий для его самопроизвольного перехода в объем расплава и, как следствие, возникновения в нем пограничного диффузионного слоя. Необходимым условием для этого является нарушение термодинамического равновесия и, как следствие, возникновение неравенства химических потенциалов растворенного вещества на поверхности и в объеме раствора – $\mu_s > \mu_v$. Оно возникает, например, при наличии контакта поверхности расплава с кислород-содержащей фазой (атмосферой; обогащенным окислами FeO и MnO шлаком; пропитанным окисленным шлаком огнеупором; а также с C- или SiO₂-содержащими огнеупорами, в которых в результате термохимических реакций в поверхностном слое образуются повышенные содержания CO, SiO и Al₂O) или при снижении объемной концентрации растворенного кислорода в стали [O]. Поскольку в большинстве случаев при разливе такие условия отсутствуют, то возникновение на межфазной границе «металл-огнеупор» или «металл-массив отложений» пограничного диффузионного слоя с градиентом концентрации кислорода в них невозможно. Следовательно, использование указанного выше физического эффекта в модельных представлениях о процессах формирования отложений не является корректным.

Появлению новых представлений о природе формирования отложений, по мнению авторов статьи, могут способствовать результаты углубленных исследований морфологии включений, присутствующих в стали и в отложениях, которые выполнены в Левенском университете (Бельгия) [11, 13]. Было установлено, что продукты раскисления в низко- и среднеуглеродистой раскисленной Al стали представлены следующими морфологическими типами:

1) Сферические включения практически чистого Al₂O₃ или с примесями окислов марганца или кремния диаметром до 5–6 мкм (рис. 1, а).

2) Идиоморфные включения с характерной гранкой (октаэдры, гексаэдры, полиэдры и др.) из Al₂O₃ (чистого или с примесями MgO) размерами 2–7 мкм (рис. 1, б).

3) Пластинчатые (plate-like) включения преимущественно гексагональной, реже – тригональной, прямоугольной и др. форм протяженностью 2–9 мкм и толщиной до 1 мкм (рис. 1, в, г, д).

4) Дендриты протяженностью 5–20 мкм преимущественно с тригональной ориентацией первичных ветвей (рис. 1, е, ж, з).

5) Кластеры (скопления) из Al₂O₃-содержащих включений, имеющих различную морфологию, максимальной протяженностью порядка 100 мкм, а в редких случаях – более 100 мкм (рис. 1, к, л).

6) Агрегаты, состоящие преимущественно из идиоморфных включений Al₂O₃, часто содержащих примеси MgO, протяженностью до нескольких десятков мкм (рис. 1 м, н).

Указанные морфологические типы твердофазных продуктов раскисления в стали представлены: 1) индивидуальными кристаллами, сформировавшимися по механизму кристаллизационного роста за счет протекания на их поверхности реакции раскисления или присоединения к ним наноразмерных устойчивых зародышей новой фазы; 2) скоплениями этих индивидов, сформировавшихся по механизму коагуляции (кластеризации, агрегации).

Следует отметить, что в отношении скоплений твердофазных продуктов раскисления, присутствующих в стали, четкая и единая классификация отсутствует. Разделение этих скоплений на кластеры и агрегаты, выполненное в работе [13], является достаточно условным. В состав кластеров могут входить включения с различной морфологией, в том числе идиоморфные, дендриты, пластинчатые и др. Часто определить морфологию включений в составе кластеров не представляется возможным. Такие кластеры чаще всего называют коралло-подобными. Некоторые исследователи не отождествляют коралло-подобные структуры с кластерами, считая, что они формируются из кластеров по механизму Оствальдовского созревания [14, 17].

Согласно результатам промышленных исследований, кластеры обнаруживаются в стали сразу после присадки алюминия на выпуске плавки. Но уже спустя 15 мин в условиях продувки металла в ковше аргоном или азотом кластеры и дендриты встречаются крайне редко, а пластинчатые включения отсутствуют вообще. Основными морфологическими типами включений, присутствующими в стали по окончании внепечной обработки, являются крупные (10–20 мкм) единичные идиоморфные включения и агрегаты из них, а также мелкие сферические включения [11, 13]. Суммарный объем последних, ввиду их достаточно малых размеров (< 1 мкм), крайне незначителен.

Включения в отложениях, образующихся при разливе низкоуглеродистой раскисленной Al стали, имеют преимущественно коралло-подобную, дендритную и пластинчатую (irregular shaped plates) морфологию (рис. 2) [11, 18]. Следует также отметить, что сходство терминологии для включений, присутствующих в стали и в составе отложений, не означает их идентичность. Так, если присутствующие в стали пластинчатые включения представляют плоские индивидуальные кристаллы в форме плоских многоугольников (рис. 1, в, г, д), то в отложениях пластинчатые структуры, имеющие приплюснутые первичные и вторичные ветви (рис. 2, в), не являются скоплением из пластинчатых индивидов, а напоминают по форме дендритные структуры. Присутствие же в структурах смешанного состава (рис. 2, г) одновременно дендритных и пластинчатых структур указывает на то, что они имеют общую природу образования. То есть, пластинчатая морфология является разновидностью дендритной, и ее формирование обусловлено действием определенных факторов.

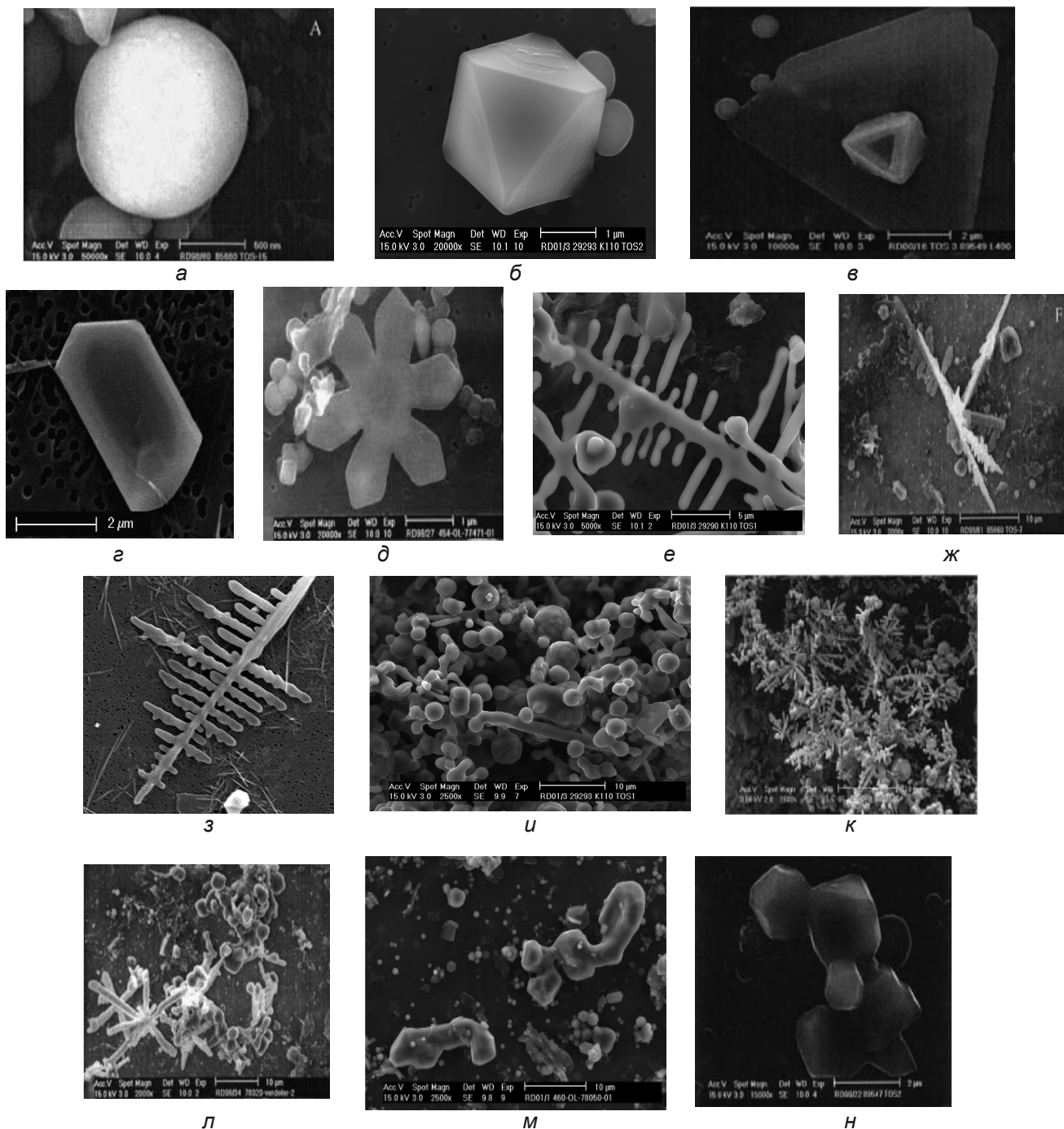


Рис. 1. Морфологические типы включений, присутствующих в стали: а – сферические [13]; б – идиоморфные [11]; в, г, д – пластинчатые [13, 14, 15]; е, ж, з – дендритные [11, 13, 16]; и – коралло-подобные кластеры [11]; к – кластеры из дендритов [14]; л – кластеры смешанного состава [11]; м, н – агрегаты из идиоморфных включений [11, 14]

Коралло-подобные кластеры в стали несколько отличаются от таковых в отложениях (рис. 1, и и рис. 2, а) как по размерам, так и по форме – если в стали средние размеры коралло-подобных кластеров не превышают 50–100 мкм [17], то в отложениях размеры коралло-подобных кластерных структур, имеющих общую направленность роста кристаллитов к потоку, значительно больше (рис. 2, а).

Отсутствие в пробах стали из промковша МНЛЗ пластинчатых включений с учетом того факта, что при разливке низкоуглеродистой ракисленной Al стали они, наряду с коралло-подобными кластерными структурами, составляли основу отложений, позволило исследователям сделать вывод о том, что главная роль

в формировании отложений принадлежит продуктам вторичного окисления в виде кластеров, а осаждение присутствующих в стали перед разливкой продуктов раскисления и модифицирования играет второстепенную роль [11]. При этом отмечается, что такой вывод не соответствует традиционным представлениям о природе формирования отложений, в том числе о том, что интенсивность отложений зависит от чистоты стали.

В работе [18] аналогичный вывод сделан в результате сравнения не только морфологии, но и фазового состава включений в стали (пробы из промковша МНЛЗ) и отложениях (погружной корундографитовый стакан) при разливке низкоуглеродистой низкокремнистой раскисленной алюминием и титаном стали. Если в

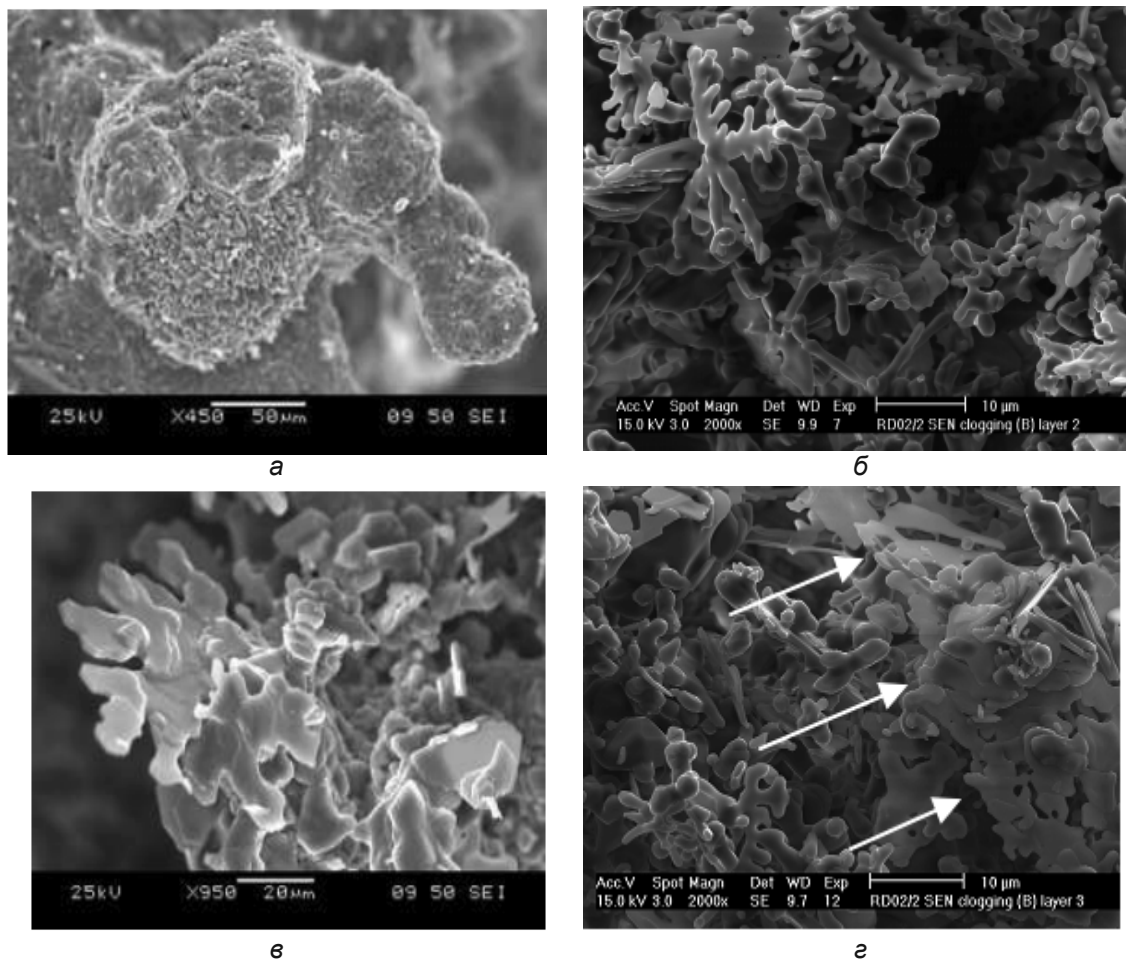


Рис. 2. Морфологические типы включений из состава отложений в разливочных огнеупорах: а – коралло-подобные кластерные структуры [18]; б – дендритные структуры [11]; в – пластинчатые структуры [18]; г – структуры смешанного состава – дендритные + пластинчатые образования (показаны стрелками) [11]

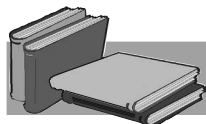
пробах стали из промковша доминировали мелкие (< 8 мкм) сферические включения алюминатов кальция с содержанием Ti_2O_3 менее 3 %, то основу отложений составляли коралло-подобные и пластинчатые включения алюминатов кальция с содержанием в них Ti_2O_3 до 12 %. Присутствие в отложениях сверхравновесного количества Ti_2O_3 является, по оценке исследователей, доказательством происхождения отложений из продуктов вторичного окисления.

Выводы

Сохраняющаяся актуальность проблемы отложений в металлопроводящих каналах огнеупоров при разливке стали в определенной мере связана с дефицитом представлений о физико-химических процессах, обуславливающих это специфическое явление. Выполненное аналитическое исследование известных на сегодня представлений о природе и закономерностях явления формирования отложений показало:

- отсутствие полной ясности в понимании роли ряда факторов (турбулентность, бескислородные огнеупоры и др.);
- отсутствие детализации по ряду аспектов рассматриваемого явления (формирование металлической фазы, различия в химическом и морфологическом составе включений в стали и отложениях);
- несоответствие некоторых базовых представлений известным положениям физики и химии (механизмы транспортировки включений к границе раздела фаз, формирование включений дендритной морфологии и др.).

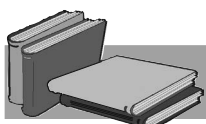
По результатам выполненных исследований можно предположить существование такой физико-химической модели явления формирования отложений, которая, отличаясь универсальным характером, распространяется на огнеупоры любого состава и на все этапы их формирования.



ЛИТЕРАТУРА

1. Rackers K.G., Thomas B.G. Clogging in continuous casting nozzles // *78th Steelmaking Conference Proceedings, USA*. – 1995. – Vol. 78. – P. 723–734. URL: <http://ccc.illinois.edu/publications.html>.
2. Дубоделов В.И., Смирнов А.Н., Ефимова В.Г. и др. Гидродинамические и физико-химические процессы в промежуточных ковшах для непрерывного литья стали. – Киев: Наукова думка, 2018. – 264 с.
3. Родионова И.Г., Зайцев А.И., Бакланова О.Н. и др. Современные подходы к повышению коррозионной стойкости и эксплуатационной надежности сталей для нефтепромысловых трубопроводов. – М.: Metallurgizdat, 2012. – 172 с.
4. New strategies for clogging prevention for improved productivity and steel quality. Final report. – Luxembourg: Publications Office of the EU, 2012. – 182 p.
5. Smith J.D., Peaslee K.D., Van Aken D.C. Steelmaking nozzles that resist clogging. Final report. – University of Missouri at Rolla, USA, July 2006. – 275 p.
6. Аксельрод Л.М., Паршин В.М., Мазуров Е.Ф. Механизм зарастания погружных стаканов при непрерывной разливке стали // *Сталь*. – 2007. – № 4. – С. 30–33.
7. Development of submerged entry nozzles that resist clogging. Final Report. – AISI. Pittsburgh, USA, Oct. 2002. – 229 p.
8. Григорян В.А., Белянчиков Л.Н., Стомахин А.Я. Теоретические основы элетросталеплавильных процессов. – М.: Металлургия, 1987. – 272 с.
9. Thomas B.G. et al. Tundish Nozzle Clogging – application of computational models // *18rd PTD Conf. Proc., Baltimore, USA*. – 2001. – Vol. 18. URL: <http://ccc.illinois.edu/publications.html>.
10. Лукавая М.С., Михайлов Г.Г. Анализ процесса затягивания погружных стаканов при непрерывной разливке стали // *Вестник ЮУрГУ. Серия: Металлургия*. – 2006. – № 10 (65). – С. 69–72.
11. Dekkers R., Blanpain B., Wollants P. et al. A morphological comparison between inclusions in aluminium killed steels and deposits in submerged entry nozzle // *Steel Research*. – 2003. – Vol. 74. – no. 6. – P. 351–355.
12. Вережников В.Н. Избранные главы коллоидной химии. – Воронеж: ИПЦ ВГУ, 2011. – 188 с.
13. Dekkers R., Blanpain B., Wollants P. et al. Non-metallic inclusions in aluminium killed steels // *Ironmaking and Steelmaking*. – 2002. – Vol. 29. – no 6. – P. 437.
14. Zhang L., Thomas B.G. Inclusions in continuous casting of steel // *XXIV National Steelmaking Symposium, Mexico, 2003*. – P. 138–183. URL: <http://ccc.illinois.edu/publications.html>.
15. Zheng L. Effect of interfacial properties on the characteristics of non-metallic inclusions in steel. Ph. D. Thesis, Leuven Catholic University, Belgium, 2016. – 232 p.
16. Zheng L., Mafflet A., Wollants P. et al. Effect of interfacial properties on the clustering of alumina inclusions in molten iron // *ISIJ Int*. 55, 2015. – P. 1891–1900.
17. Zhang L., Pluschkell W., Thomas B.G. Nucleation and growth of alumina inclusions during steel deoxidation // *85th Steelmaking Conference, USA*. – 2002. – Vol. 85. – P. 463–476. URL: <http://ccc.illinois.edu/publications.html>.
18. Алексеенко А.А., Байбекова Е.В., Кузнецов С.Н. и др. Исследование проблемы затягивания стаканов при разливке на сортовой МНЛЗ малоуглеродистой низкокремнистой стали, раскисленной алюминием // *Электрометаллургия*. – 2007. – № 2. – С. 4–18.

Поступила 02.04.2019



REFERENCES

1. Rackers, K.G., Thomas B.G. (1995). Clogging in continuous casting nozzles. *78th Steelmaking Conference Proceedings, USA*. Vol. 78, pp. 723–734. URL: <http://ccc.illinois.edu/publications.html> [in English].
2. Dubodelov, V.I., Smirnov, A.N., Yefimova, V.G. et al. (2018). Hydrodynamic and physico-chemical processes in tundishes for continuous casting of steel. Kyiv: Naukova dumka, 264 p. [in Russian].
3. Rodionova, I.G., Zaytsev, A.I., Baklanova, O.N. et al. (2012). Modern approaches to improving the corrosion resistance and operational reliability of steels for oilfield pipelines. Moscow: Metallurgizdat, 172 p. [in Russian].
4. New strategies for clogging prevention for improved productivity and steel quality (2012). Final report. Luxembourg: Publications Office of the EU, 182 p. [in English].
5. Smith, J.D., Peaslee, K.D., Van Aken, D.C. (2006). Steelmaking nozzles that resist clogging. Final report. University of Missouri at Rolla, USA, 275 p. [in English].
6. Aksel'rod, L.M., Parshin, V.M., Mazurov, Ye.F. (2007). Mechanism of overgrowing submerged nozzles during continuous casting of steel. *Stal'*, no. 4, pp. 30–33 [in Russian].
7. Development of submerged entry nozzles that resist clogging. (2002). Final Report. AISI. Pittsburgh, USA. 229 p. [in English].
8. Grigoryan, V.A., Belyanchikov, L.N., Stomakhin, A. Ya. (1987). Theoretical foundations of the electric steel melting processes. Moscow: Metallurgiya, 272 p. [in Russian].
9. Thomas, B.G. et al. (2001). Tundish nozzle clogging – application of computational models. *18rd PTD Conf. Proc.*, Baltimore, USA. Vol. 18. URL: <http://ccc.illinois.edu/publications.html> [in English].
10. Lukavaya, M.S., Mikhaylov, G.G. (2006). Analysis of the submerged nozzles clogging during continuous casting of steel. *Bulletin SUSU. Series: Metallurgy*, no. 10 (65), pp. 69–72 [in Russian].

11. Dekkers, R., Blanpain, B., Wollants, P. et al. (2003). A morphological comparison between inclusions in aluminium killed steels and deposits in submerged entry nozzle. *Steel Research*. Vol. 74, no. 6, pp. 351–355 [in English].
12. Verezhnikov, V.N. (2011). Selected chapters of colloidal chemistry. Voronezh: PPC of VSU, 188 p. [in Russian].
13. Dekkers, R., Blanpain, B., Wollants, P. et al. (2002). Non-metallic inclusions in aluminium killed steels. *Ironmaking and Steelmaking*. Vol. 29, no. 6, p. 437 [in English].
14. Zhang, L., Thomas, B.G. (2003). Inclusions in continuous casting of steel. *XXIV National Steelmaking Symposium*, Mexico, pp. 138–183. URL: <http://ccc.illinois.edu/publications.html> [in English].
15. Zheng, L. (2016). Effect of interfacial properties on the characteristics of non-metallic inclusions in steel. Ph.D. Thesis, Leuven Catholic University, Belgium, 232 p. [in English].
16. Zheng, L., Malfliet, A., Wollants, P. et al. (2015). Effect of interfacial properties on the clustering of alumina inclusions in molten iron. *ISIJ Int.* 55, pp. 1891–1900 [in English].
17. Zhang, L., Pluschkell, W., Thomas, B.G. (2002). Nucleation and growth of alumina inclusions during steel deoxidation. *85th Steelmaking Conference*, USA. Vol. 85, pp. 463–476. URL: <http://ccc.illinois.edu/publications.html> [in English].
18. Alekseenko, A.A., Baybekova, Ye.V., Kuznetsov, S.N. et al. (2007). Study of the problem of the nozzles clogging during casting of aluminum deoxidized low-carbon low-silicon steel on billet CCM. *Elektrometallurgiya*, no. 2, pp. 4–18 [in Russian].

Received 02.04.2019

Анотація

С.М. Писарський¹, інженер машини безперервного лиття заготовок (МБЛЗ), e-mail: serge.pisarsky@gmail.com; **О.М. Смірнов²**, д-р техн. наук, проф., пров. наук. співр., e-mail: stalevoz@i.ua

¹Standart Metallurgical Company, Лагос, Нігерія

²Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ, Україна

Дослідження сучасних уявлень про природу формування відкладень в вогнетривах при розливанні сталі. Повідомлення 1

При дослідженні явища формування відкладень теоретичний аналіз його фізико-хімічної природи і закономірностей, поряд з пошуком заходів протидії, завжди розглядався як пріоритетний напрям. Однак ряд принципів питань, пов'язаних з цим явищем, продовжує досі залишатися предметом наукових дискусій. Виконане аналітичне дослідження відомих на сьогодні уявлень про механізми (моделі) формування відкладень показало: відсутність повної ясності в розумінні ролі ряду факторів; відсутність деталізації по ряду важливих аспектів даного явища; невідповідність деяких базових уявлень про процеси, які супроводжують формування відкладень, відомим положенням фізики і хімії.

На підставі термодинамічного аналізу процесу адсорбції поверхнево-активного в залізі кисню показано, що уявлення, яке отримало помітне поширення, про інтенсивний рух включень в градієнтних (дифузійних) полях концентрації кисню на міжфазному кордоні «метал-вогнетрив (масив відкладень)» стосовно до фактичних умов розливання є в більшості можливих випадків некоректним.

В ході порівняльного морфологічного аналізу включень, присутніх в сталі і у відкладеннях, показано, що схожість термінології у визначенні морфологічних типів для них не означає їх ідентичність. Відмінності в морфології і хімічному складі порівнюваних включень вказують на те, що формування відкладень не завжди пов'язане з осадженням на поверхні вогнетривів присутніх в сталі продуктів розкислення.

На підставі результатів аналітичних досліджень зроблено попередній висновок про необхідність розробки, на додаток до існуючих, нової моделі цього явища. Відрізняючись універсальним характером, вона повинна поширюватися на вогнетриви будь-якого складу і на всі етапи формування відкладень.

Ключові слова

Розливання сталі, формування відкладень, вогнетриви, природа і закономірності явища, модельні уявлення, базовий механізм.

S.N. Pisarskii¹, Engineer of continuous casting machine (CCM),

e-mail: serge.pisarsky@gmail.com

A.N. Smirnov², Doctor of Engineering Sciences, Prof., Leading Researcher,

e-mail: stalevoz@i.ua

¹*Standart Metallurgical Company, Lagos, Nigeria*

²*Physico-technological Institute of Metals and Alloys of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine*

The study of modern concepts about the nature of deposits in refractories during casting of steel. Report 1

When studying the phenomenon of clogging, a theoretical analysis of its physicochemical nature and regularities, along with the search for countermeasures, was always considered as a priority. However, a number of fundamental issues related to this phenomenon, still continues to be the subject of scientific discussions. The performed analytical study of currently known ideas about the mechanisms (models) of the deposit formation showed: the lack of complete clarity in understanding the role of a number of factors; lack of detail on a number of important aspects of the phenomenon under consideration; discrepancy of some basic ideas on the processes accompanying the formation of deposits, to the known thesis of physics and chemistry. Based on the thermodynamic analysis of the process of adsorption of surface-active oxygen in iron, it has been shown that the idea of intensive movement of inclusions in the gradient (diffusion) fields of oxygen concentration at the "metal-refractory (deposit)" interface in majority of the possible cases is incorrect.

In the course of a comparative morphological analysis of inclusions present in steel and deposits, it was shown that the similarity of terminology in the definition of morphological types for them does not mean their identity. Differences in the morphology and chemical composition of the compared inclusions indicate that the formation of deposits is not always associated with the precipitation onto the surface of refractories of deoxidation products present in the steel.

Basing on the results of analytical studies it was preliminary concluded, that it is necessary to develop, in addition to the existing one new model of this phenomenon. Differing in its universalism, it should extend to refractories of any composition and to all stages of the deposit formation.

Casting of steel, formation of deposits, refractories, nature and regularities of the phenomenon, model concepts, basic mechanism.

Концепция роторно-конвейерного комплекса для литья по газифицируемым моделям и термообработки отливок

Роторно-конвейерные комплексы (РКК) обеспечивают совмещение транспортных и технологических операций литейных процессов. Такие конвейерные технологии литья в песчаные формы позволяют получать заготовки высокого качества и способствуют автоматизации производственного процесса. Следуя концепции проф. О.И. Шинского о модульной комплектации высокопродуктивного, экологически безопасного, автоматизированного оборудования и РКК на основе новых технологий с использованием физически связанных разрезов и криотехнологиями формовочных материалов, выполнено объединение линии для производства разовых пенополистирольных моделей с роторными формовочными модулями, заливочным конвейером и термической печью. Включение в РКК кольцевой термической печи, в качестве одного из роторных транспортно-технологических конвейерных модулей, позволяет выполнить термообработку отливок для получения бейнитных структур металла с высокими эксплуатационными характеристиками, что дает основание называть такой РКК литейно-термическим. Описанная концепция сочетания технологии литья по газифицируемым моделям, применения вакуумируемых форм с песком без связующего, выбивки отливок в горячем состоянии и, минуя перлитное превращение для железоуглеродистых сплавов, изотермической их закалки (аустемперинга) позволяет использовать новейшие научные и прикладные знания в области синтеза конструкционных и специальных чугунов и сталей с высокими механическими свойствами. Описанный РКК обеспечит рост производительности производства, сокращение его энерго- и трудоемкости, производственных площадей, соответствует современному высокотехнологичному оборудованию, проектирование которого основано как на учении акад. Л.Н. Кошкина, так и на научно-технологических разработках и патентах ФТИМС НАН Украины.

Ключевые слова: роторно-конвейерный комплекс, литье по газифицируемым моделям, отливка, модульная конструкция, высокопрочный чугун, термообработка, бейнитная структура, изотермическая закалка.

В глобальном масштабе среднесрочное будущее литейного производства прогнозируется позитивно. По мнению гендиректора Foundry-Planet Томаса Фрича, история развития литейного производства в течение нескольких тысяч лет свидетельствует, что наша отрасль была и остается прекрасным «сейсмографом» тенденции экономического развития в целом, и сейчас мы ощущаем явные признаки изменений [1]. Переход на электромобили (E-Mobility), освоение цифрового мира, который бесконечно быстрее нашего восприятия, осознание и принятие концепции «Интернета вещей» (IoT) – в числе задач, подлежащих решению литейщиками.

При этом актуальным остается рост производительности литейного производства, который способны обеспечить роторно-конвейерные линии (РКЛ), конкурируя с традиционными автоматическими формовочными линиями (АФЛ). Принцип работы и ряд примеров РКЛ для машиностроения описал академик Л.М. Кошкин [2]. Ранее реализация оборудования типа РКЛ в литейном производстве не имела успеха, так как использование таких комплексов, прежде всего, нуждается в новых технологических процессах песчаной формовки, охлаждения отливок в форме, а также изготовления моделей. Основные принципы построения РКЛ легче всего осуществить в цепи операций, выполняемых с примерно одинаковой продолжительностью на синхронно вращающихся столах или каруселях, в свою очередь выстроенных так,

что обработка изделий совмещается с их транспортированием вместе с формообразующей оснасткой, инструментами и исполнительными органами.

Анализ условий реализации модельно-формовочных, заливочных и охлаждающих отливку технологий для РКЛ показал, что ближе всего к таким условиям подходят способы литья по газифицируемым моделям (ЛГМ), которые благодаря использованию разовых моделей позволяют быстро изменять номенклатуру литья и расширить диапазон серийности выпускаемой РКЛ продукции. О преимуществе быстрого перехода на новый вид отливки на линиях ЛГМ отмечается в материалах недавнего симпозиума, посвященного рассмотрению новых достижений в области ЛГМ-процесса [3], что кратко прокомментируем ниже.

Симпозиум проходил на базе института технологии материалов в г. Бремен (Германия) и включал экскурсию в данный институт, где наряду с последними достижениями технологии ЛГМ, участников ознакомили с перспективами применения этого процесса для производства отливок электромобилей. Эти работы институт проводит совместно с концерном «Folksvagen», который с 2020 г. переходит на серийный выпуск электромобилей. Среди 13 докладов представителей различных стран, в том числе Германии, Китая, Нидерландов, Великобритании, Мексики, США, Ирана и др., Россия была представлена докладом «Новое оборудование и технология ЛГМ для получения отливок из стали и высокопрочного чугуна» [3].

Китайским представителем на симпозиуме были приведены примеры ЛГМ различных типов отливок, в том числе для тракторов, блоков и головок двигателей, а также крупных отливок весом до 10 тонн. В настоящее время Китай ежегодно выпускает более 2 млн тонн отливок методом ЛГМ, являясь мировым лидером такого производства. Это было достигнуто практически за последние 10 лет путем организации 10–15 крупных литейных производств, а большинство (~ 750) составляют литейные цехи с годовым количеством 3–5 тыс. тонн.

Особый интерес вызвал доклад представителя Мексики о самом крупном литейном заводе с годовым выпуском 50 тыс. тонн отливок из серого и высокопрочного чугунов для всемирно известных фирм «John Deere», «Caterpillar» и др. Большинство докладов было посвящено контролю технологических параметров ЛГМ-процесса для обеспечения высокого качества отливок. Российскими участниками был представлен доклад о новом оборудовании для производства высококачественных отливок широкой номенклатуры с практически полным контролем параметров процесса ЛГМ компьютерными программами и возможностью перехода на новую модель отливки в течение не более 10–15 минут, что достигается за счет специальной конструкции модельных автоматов. Разработанный и освоенный комплекс ЛГМ позволяет получать отливки, исключая человеческий фактор, что актуально для создания мелких литейных цехов с годовой мощностью до 5 тыс. тонн [3].

Отечественные разновидности ЛГМ-процесса, созданные в Физико-технологическом институте металлов и сплавов НАН Украины, включают ускоренное охлаждение отливок в песчаной форме путем интенсификации конвективного теплоотвода [4, 5], что актуально для регулирования длительности выдержки отливки в форме при синхронизации операций на РКЛ. Применение принципов проектирования РКЛ для ЛГМ-процесса в совокупном, комплексном использовании научно-технологического опыта и конструкторских решений позволит увеличить производительность, уменьшить операционные запасы материалов, сократить цеховые площади, а также энергоемкость, трудоемкость, себестоимость литья и капитальные затраты с ускорением их окупаемости. ЛГМ-процесс обладает потенциалом снижения массы литых конструкций по сравнению с современной литой металлопродукцией Украины и стран СНГ примерно в 1,5 раза, а по сравнению с Западной Европой – в 1,3 раза, что, соответственно, ведет к сокращению энергоносителей, шихтовых материалов, трудоемкости производства отливок в 1,5–2,0 раза.

Предварительно проведенный обзор патентной информации о конструкциях линий изготовления литейных форм, как ближайших «конкурентов» РКЛ, с целью оптимизации концепции их проектирования показал следующее. Например, формовочная линия (А. с. СРСР № 1131588А) включает один автомат для изготовления нижних и верхних полуформ с механизмами установки и выбивки форм. Она имеет технологический и транспортный конвейеры для верхних и нижних полуформ с двумя параллельными

ветвями. Технологические возможности такой линии обусловлены совмещением операций изготовления полуформ одним автоматом, удаления и составления полуформ на одной позиции, что снижает ее эксплуатационную надежность.

Рассмотрена также автоматическая линия безопочной формовки (А. с. СССР №651887) с двумя последовательно расположенными формовочными автоматами. Она также оснащена транспортным конвейером, двумя устройствами для перестановки и кантования полуформ в виде приводной решетки, на которой установлена рамка с приводом ее вращения. К недостаткам этой линии можно отнести конструктивную сложность, низкую надежность и недолговечность приводной каретки с установленной на ней рамкой и приводом вращения, что с высокой вероятностью приведет к ее заклиниванию, остановкам в работе и снизит надежность и производительность всей линии.

При обзоре конструкций линий для производства разовых моделей к аналогам для нашего проектирования отнесена автоматическая РКЛ преимущественно для изготовления парафино-стеариновых выплавляемых моделей (А. с. СССР № 1603612А1), содержащая два перегрузочных роторных автомата, размещенных между встречными ветвями конвейеров, в которых количество мест крепления пресс-форм кратное количеству перегрузочных роторных автоматов. Роторные автоматы и конвейеры объединены в технологический поток, что отвечает сути РКЛ, но эти автоматы конструктивно сложны, показанный вид крепления пресс-форм к кронштейнам конвейеров приведет к остановкам в работе и снижению производительности. Отсутствие в этой РКЛ ряда устройств для обработки исходного пенополистирола (ППС), роторного автомата и другого оборудования для получения пенополистирольных моделей значительно снижает производительность и технологические возможности использования линии для получения качественных газифицируемых моделей, применяемых в процессе ЛГМ, а также повышает удельные расходы материалов, энергоресурсов и ухудшает условия труда.

Разработанная под руководством проф. Шинского О.И. концептуальная конструкция РКЛ [6] оптимально обеспечивает процесс изготовления газифицируемых моделей путем оснащения ее устройствами и оборудованием, последовательно выполняющими технологически необходимые операции, и, приняв на входе исходный материал, выдает на выходе готовые кусты или кластеры газифицируемых моделей (рис. 1). Методом преодоления недостатков рассмотренных аналогов и на основе опыта проектирования комплексов ЛГМ [7] создана такая конструкция РКЛ.

Она состоит из последовательно расположенного следующего оборудования: устройства предварительного рассева гранул полистирола 1, пневмотранспортного элеватора 2, дозировочной установки для подвспенивания прошедших рассев гранул 3, расположенной под установкой роторного автомата 4 для получения пенополистирольных моделей, оснащенного устройством 5 для задувки пенополисти-

рола в разъемные пресс-формы 6, закрепленные на подвижных плитах 7. Также имеется устройство 8 для спекания ППС в пресс-формах и устройство 9 для охлаждения разъемных пресс-форм 6 с полученными пеномоделями 10. Подвижные плиты 7 расположены в кольцевых камерах 11 туннельного типа. По касательной к автомату расположен конвейер выдержки пенополистирольных моделей 12, конвейер 13 сборки кустов таких моделей, конвейер 14 покраски кустов моделей, конвейер 15 сушки кустов моделей и транспортный конвейер 16 готовых кустов 17 газифицируемых моделей.

РКЛ оснащена приводной станцией 18 и работает следующим образом. Исходный материал – гранулированный полистирол после прохождения через устройство предварительного отсева 1 приобретает необходимый гранулометрический состав и пневмотранспортным элеватором 2 подается в дозирующую установку подвешивания гранул. Подвешенный подготовленный ППС подается в расположенный под установкой 3 роторный автомат 4 для получения пенополистирольных моделей. В этом автомате устройством для задувки 5 выполняется задувание ППС в разъемные пресс-формы 6, закрепленные на подвижных плитах 7.

Устройством для спекания пенополистирола 8 выполняется спекание задутого в пресс-формы ППС, а устройством 9 – охлаждение разъемных пресс-форм 6 с пеномоделями. Охлажденные пеномодели 10 извлекаются из разъемных пресс-форм 6 и подаются на конвейер 12 для выдержки этих моделей. На конвейере 13 выполняется сборка пенополистирольных моделей в кусты, а на конвейере 14 – покраска этих кустов. На конвейере 15 кусты пенополистирольных моделей сушат, и транспортным конвейером 16 подают готовые кусты газифицируемых моделей по назначению. Движение и синхронная работа всех составляющих частей линии обеспечивается приводной станцией 18. В случае необходимости для тонкостенных моделей с развитой поверхностью возможно оснащение линии дополнительным конвейером для сушки окрашенных моделей [8].

Следуя концепции проф. Шинского О.И. о модульной комплектации высокопродуктивного, экологически безопасного, автоматизированного оборудования и литейных роторно-конвейерных комплексов (РКК) на основе новых технологий с использованием физически связанных разрежением и криотехнологиями формовочных материалов, в развитие проектирования конструкций РКЛ выполнили объединение линии для производства разовых моделей с роторными формовочными модулями и другим описанным ниже оборудованием. Пример аналогичного модуля описан в работе [9]. Также данная РКЛ (рис. 1) по производству моделей пригодна для встраивания в действующие литейные комплексы, типа описанных в патенте [7]. Кроме того, по мнению автора, перспективным направлением является совмещение модельных и литейных линий с РКЛ, на которых производится термообработка отливок для оптимизации их механических свойств, улучшения обрабатываемости, в том числе для дальнейшей механообра-

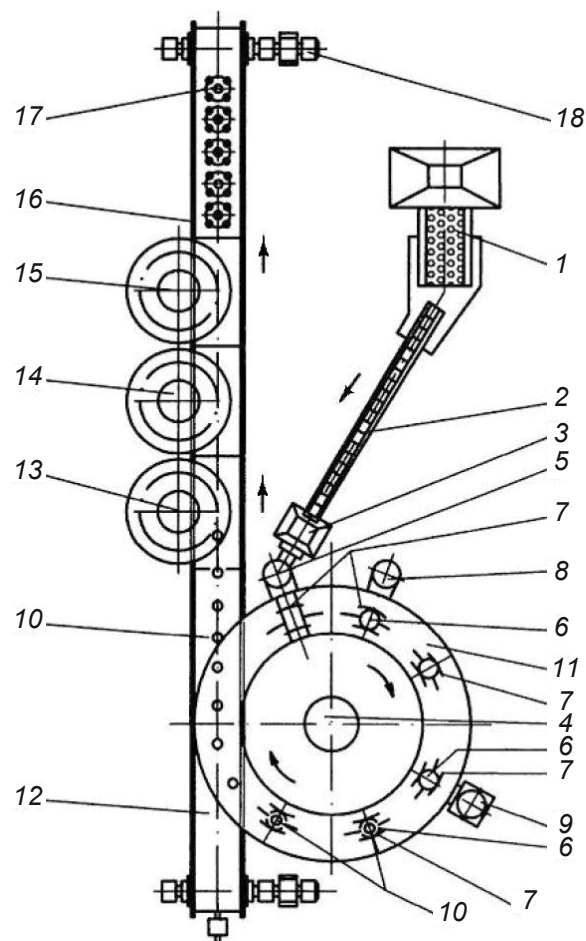


Рис. 1. РКЛ для производства пенополистирольных моделей [6]

ботки на РКЛ или станках с числовым программным управлением (ЧПУ). В целом, идеальное решение задачи представляется в получении готовых к сборке металлических заготовок с максимальным использованием возможностей РКЛ.

Далее рассмотрим изложенную в этой статье концепцию комплектации РКК роторными формовочными модулями в сочетании с линией термообработки отливок, что относится к основным положениям новизны этой статьи. Роторный формовочно-заливочный модуль (рис. 2, оборудование схематично показано на схеме в составе РКК) устроен таким образом, что по настилу движется роторная карусель 1, которая опирается на настил через шаровые пары и по центру карусели имеет вертикальную стойку с шестью рычагами (спицами) [9]. Пошаговое перемещение на 60° роторной карусели с тележками 2, имеющими по четыре катка, по настилу осуществляют пневмоприводом 3, который имеет пневмоцилиндр с закрепленным на штоке упорно-возвратным механизмом.

Контейнеры и контейнерные формы устанавливаются на 6 тележек, имеющих центрирующие элементы. Загрузочное устройство 4 для подачи формовочного песка в контейнер закреплено на стойке и обладает подвижностью в вертикальном и горизонтальном направлениях. Устройство 5 для перестановки формы на заливочный конвейер имеет привод 6, который позволяет перемещать готовые контейнерные формы. Для манипуляций с формой она

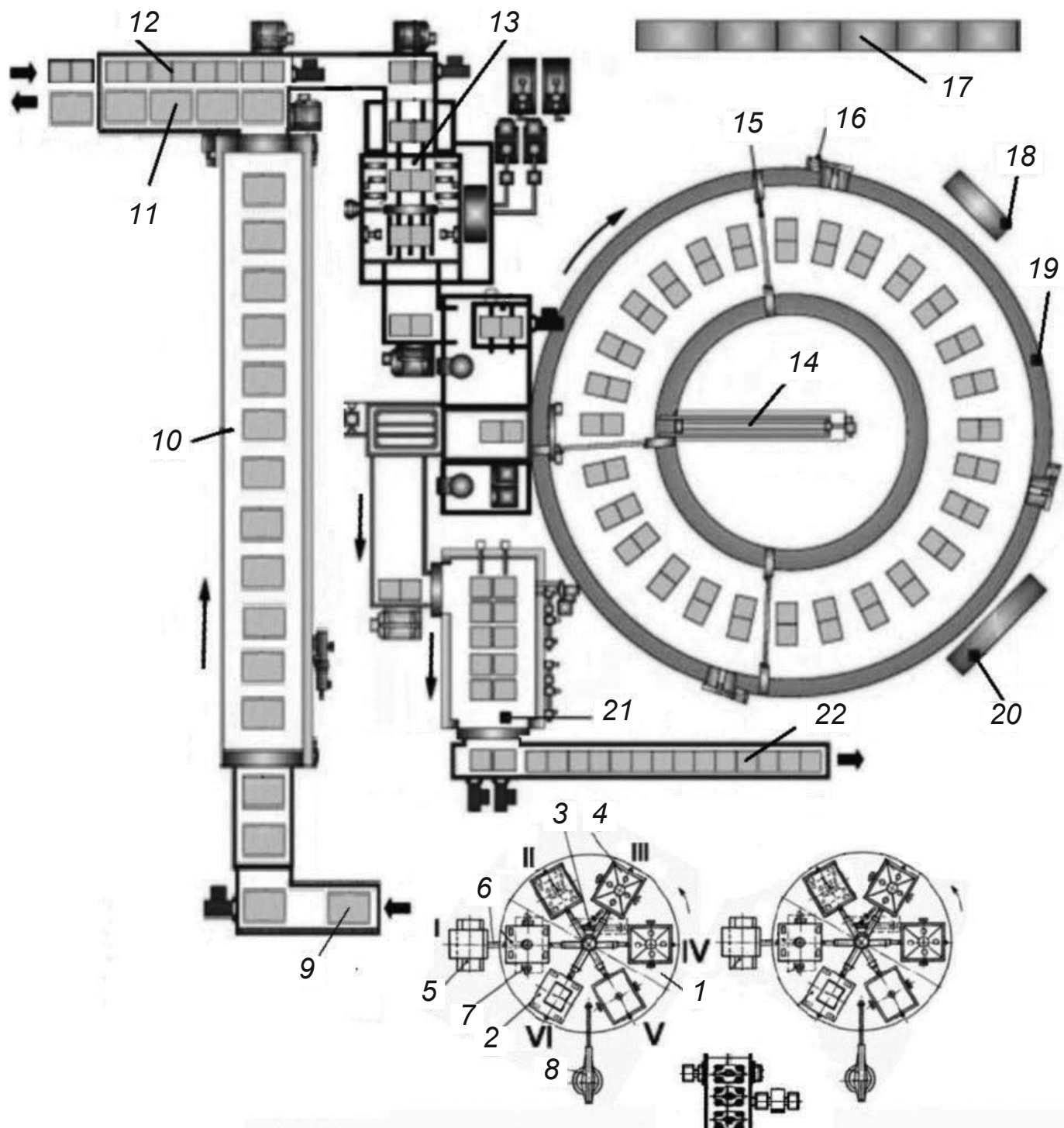


Рис. 2. Схема РКК с двумя роторными формовочными модулями и кольцевой термической печью непрерывного действия

может подключаться к вакуумной системе с помощью устройства 7 модуля для вакуумирования (откачки воздуха) через клапаны формы. Установка пустых контейнеров на тележки 2 осуществляется консольным краном 8.

Данная конструкция модуля обеспечивает автоматизацию изготовления песчаной формы по газифицируемым моделям, подаваемым из РКЛ (рис. 1), часть выдающей конвейерной ветки с моделями которого условно изображена в нижней части рис. 2. Получаемая контейнерная форма состоит из уплотненного и загерметизированного сверху синтетической пленкой формовочного песка с пенополистирольными моделями и литейной воронкой. Удаление формы с

формовочного модуля выполняют на поз. I с помощью устройства 5 или специальным краном. Такие формы 9, переставленные на конвейер под заливку металлом, показаны окрашенные серым цветом.

Функционирование формовочного модуля производится следующим образом. На поз. VI или V (в разных вариантах формовки) устанавливают пустую контейнерную опоку (контейнер), опуская на центrovочные штыри тележки роторного модуля при помощи консольного крана 8, и начинают цикл операций формовки. На поз. IV производят засыпку песчаной подушки на дно контейнера. Формовочный песок подают четырьмя питателями загрузочного устройства 4, которое перемещают при помощи пневмопривода

по вертикали и вращая вокруг вертикальной стойки, а запыленный воздух отсасывают через центральный гофрированный трубопровод. Четыре питателя загрузочного устройства позволяют подать песок не на верхнюю поверхность модели, а по четырем углам контейнера с затеканием песка к стенкам модели после отражения от стенок контейнера. Это уменьшает пылеобразование и трение песка о модель. На поз. III после установки модели (кустов моделей) на песчаную подушку производят засыпку основной массы песка, на поз. II производят его виброуплотнение, досыпку и герметизацию контейнера синтетической пленкой. Длительность цикла работы такого модуля определяется продолжительностью технологических операций на поз. II, как наиболее трудоемких, и находится в пределах 4–6 минут [9].

На рис. 2 показан комплекс с двумя роторными формовочными модулями. Если с РКЛ (рис. 1) поставятся сравнительно крупные модели и формуются в режиме «одна модель – одна форма», то задействуют оба формовочных модуля. Также в контейнере могут формовать модельные кусты (кластеры), смонтированные из 4–6 и более отдельных моделей, в свою очередь каждая из которых может состоять из двух и более частей, выполненных роторным автоматом на РКЛ (рис. 1). В этом случае будет достаточно работы одного формовочного модуля в соответствии с производительностью модельной РКЛ. Такая двухмодульная компоновка расширяет номенклатуру и серийность выпускаемой продукции проектируемого комплекса.

После подачи на конвейер 10, формы заливаются металлом в соответствии с известными способами ЛГМ, отливки затвердевают, движутся в формах вдоль конвейера и охлаждаются до определенной температуры. Для отливок из железоуглеродистых сплавов, в частности из высокопрочных чугунов (ВЧ), которые по массе составляют около 25 % мирового производства литья, в последнее время, согласно обширному объему технической информации на эту тему [5, 10–14], целесообразно проводить термообработку для получения бейнитной структуры, что значительно упрочняет металл, как показано на рис. 3 [10]. Поэтому в данной концепции проектирования РКК линия термообработки отливок включена в предлагаемый комплекс (рис. 2), на основе разработок ФТИМС НАН Украины [5, 13–14], а также с учетом статьи [11] по проектированию преимущественно конвейерных установок для упрочнения металла путем получения его с бейнитной структурой (plant design for bainite hardening).

Кольцевая термическая печь в составе литейно-термического РКК (рис. 2) подобна конструкциям кольцевых термических печей непрерывного действия, схемы которых показаны в работе [12]. Такие печи пригодны для термообработки заготовок с литого состояния, согласно способу [13]. Этот способ состоит в быстром извлечении из сыпучего песка формы затвердевшей горячей отливки с аустенитной структурой ВЧ и быстром охлаждении отливки (закалки), исключая перлитное превращение, до температуры начала образования бейнитной струк-

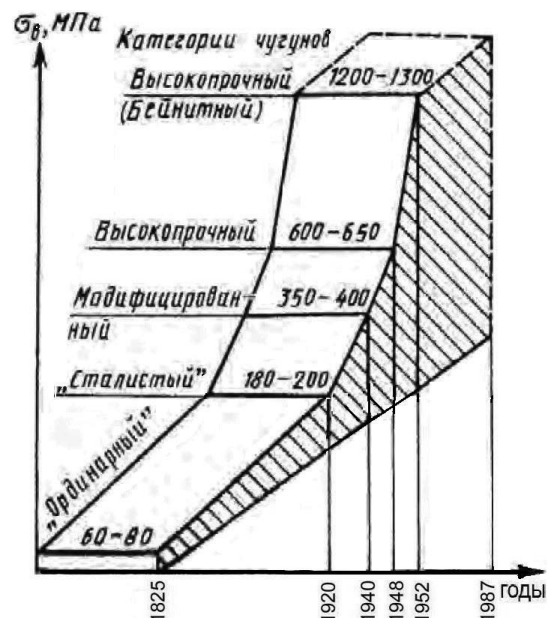


Рис. 3. Развитие научных и прикладных знаний в области синтеза конструкционных и специальных чугунов с высокими эксплуатационными характеристиками [10]

туры. Затем производится изотермическая выдержка отливки в интервале температур бейнитного превращения, которая «закрепляет» в отливке эту структуру, после чего отливку охлаждают на воздухе.

В нашем примере формы с охлаждающими в них отливками движутся по конвейеру 10 и затем попадают в тамбур извлечения отливки из формы. Далее контейнеры 11 с песком (формы без отливки) удаляются с конвейера (по стрелке на рис. 2), а отливки перегружаются на лотки 12 и вместе с ними перемещаются на операцию закалки в системе 13 с закалочными ваннами в жидких средах. Для упрощения извлечения горячих отливок из формы внутрь контейнера перед подачей на тележку 2 формовочного модуля могут вставлять сетчатую (проволочную) корзину, за проушины которой удобно извлечь эту корзину с отливкой и установить ее на лоток 12 [14]. Такой способ выгрузки и дальнейшего перемещения отливок в корзине по последующим технологическим операциям удобен для мелких отливок, получаемых в кустах, он предотвращает случайное отламывание и потерю отливок, например, в закалочной ванне или термической печи.

Пройдя закалку, отливки на лотках попадают через систему тамбуров в кольцевую печь 19, в которой загрузка – выгрузка отливок выполняется толкателем 14 [12]. Печь также имеет промежуточные перегородки (двери) 15 для создания требуемого режима термообработки (различных зон нагрева), двери 16 для сборки и ремонта, шкаф управления 17, нагреватель 18 и систему для подачи газа 20. Выйдя из печи, отливка на лотке проходит сквозь тамбур охлаждения 21 и попадает на конвейер 22 для окончательного охлаждения и удаления из литейно-термического РКК.

Печи с вращающимся или рольганговым подом оптимально подходят для непрерывных процессов на небольшой площади. Они нагреваются электричеством (с использованием вентиляторов для циркуляции

газов) или газовыми горелками, производительность кольцевых печей составляет 500–1000 кг/ч [12] в диапазоне рабочих температур 150–980 °С. Печи применяют для таких видов термообработки изделий из различных сплавов: закалка, нормализация, отжиг, науглероживание, карбонитрация и др.

Дополнительно следует отметить некоторую особенность формовки оболочковых корпусных отливок с закрытыми – «глухими» полостями при ЛГМ. К ним относятся чугунные корпуса боеприпасов, закрытые (с одним отверстием) полости моделей которых традиционно засыпают формовочным песком сверху, и эти полости формируют в виде висячих песчаных «болванов». Очевидно, что стоячие песчаные конструкции из песка без связующего менее склонны к осыпанию при заливке металла в форму, чем висячие. В первом случае силы веса песка увеличивают силы его внутреннего трения, сжимая «болван», а во втором – уменьшают, растягивая его. Кроме того, при извлечении горячей отливки из формы, согласно способам [13, 14], следует быстро высыпать песок из полостей, для чего необходимо кантование на 180° куста отливок, что трудно будет сделать для отливок в аустенитном состоянии с температурой порядка 900 °С.

Исходя из описанных условий литья таких оболочковых отливок способом ЛГМ с термообработкой из горячего литого состояния, предложен вариант способа формовки моделей с засыпкой их полостей сверху и виброуплотнением песка, герметизацией формы пленкой и вакуумированием, а затем кантованием формы на 180° [15] при перестановке ее с роторной карусели 1 формовочного модуля на заливочный конвейер 10 (рис. 2). Тогда при формовке модельный куст устанавливают литниковой воронкой книзу на тележке 2 (в варианте на направляющем штыре), предварительно застелив верхнюю поверхность тележки пленкой. Затем сверху устанавливают не контейнерную, а рамочную опоку, которую засыпают песком и герметизируют сверху пленкой после его виброуплотнения. В вакуумируемом состоянии формы обе пленки прижимаются к форме, таким образом, упрочненную форму снимают с тележки, кантуют и устанавливают в положение 9 в начале заливочного конвейера. При этом воронка оказывается сверху, «болваны» оказываются стоячими, и песок из них легко высыпается из затвердевших отливок при извлечении последних из формы вверх. Отсутствует операция создания песчаной подушки (постели) для установки на нее модельного куста. В таком способе литья приемлема как сифонная, так и дождевая литниковая система, вторая – более экономная по расходу металла.

Описанные конструкции конвейерных устройств могут служить примерами реализации ранее не раскрытых инновационных возможностей литья по разовым моделям путем применения высокой текучести сухого песка, как внутреннего резерва такого вида формовки, в процессе быстрой выбивки отливки из формы и подачи ее на термообработку в горячем состоянии. Также и сама термообработка для достижения повышенных механических свойств, например, показанных на рис. 3, способствует раскрытию вну-

тренного потенциала, свойственного многим железоуглеродистым сплавам, что отмечено в описаниях патентов [13, 14, 16].

Ниже показаны типовые примеры моделей и отливок, которые целесообразно использовать и получать при эксплуатации описанного РКК (рис. 4). Они взяты из последней практики ЛГМ-процесса и разработок отдела физико-химии литейных процессов под руководством проф. Шинского О.И. Для экономии места фотографии изображены методом коллажа.

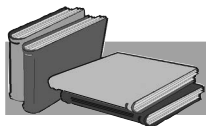
Выводы

Предложенная схема РКК на основе ЛГМ-процесса достигает следующих преимуществ по сравнению с аналогами: расширенные технологические возможности РКП [6] для производства моделей при обеспечении гарантированного равномерного гранулометрического состава исходного материала ППС; необходимая дозированная подача подвспененного материала внутрь пресс-формы; спекание в автоматической режиме; охлаждение пенополистирольных моделей и их подача на конвейер для выдержки, составления, окрашивания, сушки и транспортировки готовых кустов газифицируемых моделей с последующей подачей их на роторные формовочные модули [9] или стационарные действующие формовочные установки [7]. Расширение технологических возможностей линии, повышение ее надежности и производительности приведет к росту качества изготовления газифицируемых моделей, расчетному сокращению удельных расходов материалов и энергоресурсов на 12–14 %, по сравнению с действующими участками ЛГМ, а также к улучшению условий труда [6].

Включение в РКК термической печи с ротационным подом и неподвижным кольцевым каналом за счет возможности быстрого удаления отливки из сыпучего песка формы позволяет с горячего аустенитного состояния отливки (из многих железоуглеродистых сплавов), исключая перлитное превращение, выполнить ее изотермическую закалку для получения бейнитных структур с высокими эксплуатационными характеристиками. Описанный РКК позволит экономить энерго- и капитальные затраты, производственные площади, соответствует современному высокотехнологичному оборудованию, концепция которого во многом основана на научно-технологических разработках и патентах ФТИМС НАН Украины.



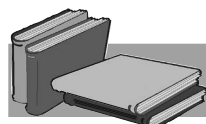
Рис. 4. Примеры моделей и отливок, использование и получение которых возможно на РКК



ЛИТЕРАТУРА

1. *Fritsch T.* Seismograph: Casting Production // *Global Casting Magazine*. – 2018. – Vol. 8. – Iss. № 4. – P. 9.
2. *Кошкин Л.Н.* Роторные и роторно-конвейерные линии: 3-е изд. перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1991. – 400 с.
3. *Котович А.В.* Международный симпозиум по технологии литья по газифицируемым моделям (г. Бремен 7–8.11.2018). URL: <http://simbirsk-furnace.ru/informatsiya/novosti/146>
4. *Шинский О.И., Дорошенко В.С., Кравченко В.П.* Интенсификация теплообмена отливки с дисперсным наполнителем литейной формы при применении хладагента и вынужденной конвекции // *Процессы литья*. – 2009. – № 5. – С. 74–82.
5. *Дорошенко В.С., Калужный П.Б.* Технологические принципы создания скоростных процессов литья в вакуумируемые формы для роторно-конвейерных комплексов // *Процессы литья*. – 2018. – № 3. – С. 23–34.
6. Патент Украины 43781, МПК B22C 7/00, B22C 11/00. Роторно-конвейерная линия для изготовления газифицируемых моделей / И.О. Шинский, О.И. Шинский, П.Н. Каричковский и др. – Оpubл. 25.08.2009, Бюл. № 16.
7. Патент Украины 45814, МПК B22D 27/00; B22D 47/00. Литейный комплекс для изготовления отливок по газифицируемым моделям / И.О. Шинский, О.И. Шинский, П.Н. Каричковский и др. – Оpubл. 25.11.09, Бюл. № 22.
8. *Дорошенко В.С., Бердыев К.Х.* Расчет конвейера для сушки окрашенных пенопластовых моделей серийного литья // *Литье Украины*. – 2014. – № 7. – С. 13.
9. *Дорошенко В.С., Бердыев К.Х.* Конвейеры непрерывного действия для литья по разовым моделям в песчаных формах, упрочняемых под воздействием вакуума // *Процессы литья*. – 2011. – № 5. – С. 49–56.
10. *Бобро Ю.Г.* Металловедение литейных сплавов. Достижения и проблемы // *Библиотека литейщика*. – 2018. – № 3. – С. 9–15.
11. *H. Altena, K. Buchner.* Process technology and plant design for bainite hardening // *La Metallurgia Italiana*. – 2016. – № 3. – P. 23–26.
12. *H. Altena, F. Schrank.* Modern gas-carburizing technology for the automotive industry // *Heat treating progress*. – 2007. – March/April. – P. 17–22.
13. Патент Украины 123731, МПК B22 D7/00, B22 D23/00, C21D5/02, C21D1/20, B22 D27/04. Способ изготовления отливок из бейнитного или аусферитного чугуна с шаровидным графитом / В.С. Дорошенко, В.О. Шинский. – Оpubл. 12.03.2018, Бюл. № 5.
14. Заявка u201807139 Украина, от 25.06.2018, МПК B22D 7/00, B22D 23/00, B22D 27/04, C21D 1/20. Способ изготовления отливок / В.С. Дорошенко, В.О. Шинский. Решение о выдаче патента от 1.10.2018.
15. Патент Украины 82837, МПК B22C 9/02. Способ формования // О.И. Шинский, В.С. Дорошенко. – Оpubл. 12.08.2013, Бюл. № 15.
16. Заявка u201807117 Украина, от 25.06.2018, МПК B22 D7/00, B22 D23/00, C21D5/02, C21D1/20, B22D27/04. Способ изготовления отливок из бейнитного или аусферитного железоуглеродистого сплава (чугуна, стали) / В.С. Дорошенко, В.О. Шинский. Решение о выдаче патента от 06.11.2018.

Поступила 15.01.2019



REFERENCES

1. *Fritsch, T.* (2018). Seismograph: Casting Production. *Global Casting Magazine*, Vol. 8, Iss. no. 4, p. 9 [in English].
2. *Koshkin, L.N.* (1991). Rotary and rotary conveyor lines: 3rd ed. reclaiming and add. Moscow: Mashinostroenie, 400 p. [in Russian].
3. *Kotovich, A.V.* (2018). International symposium on casting technology for gasified models (Bremen, 7–8.11.2018). URL: <http://simbirsk-furnace.ru/informatsiya/novosti/146> [in Russian].
4. *Shinskiy, O.I., Doroshenko, V.S., Kravchenko, V.P.* (2009). Intensification of casting heat exchange with a dispersed filler of a mold when using a refrigerant and forced convection. *Casting processes*, no. 5, pp. 74–82 [in Russian].
5. *Doroshenko, V.S., Kalyuzhnyi, P.B.* (2018). Technological principles for creating high-speed casting processes in evacuated molds for rotary conveyor complexes. *Casting processes*, no. 3, pp. 23–34 [in Russian].
6. *Shinskiy, I.O., Shinskiy, O.I., Karichkovskiy, P.N.* et al. (2009). Rotary conveyor line for fabricated gasified patterns. Patent UA, no. 43781. Opubl. 25.08.2009, Biul. no. 16 [in Russian].
7. *Shinskiy, I.O., Shinskiy, O.I., Karichkovskiy, P.N.* et al. (2009). Foundry complex for the manufacture of castings for gasified models. Patent UA, no. 45814. Opubl. 25.11.09, Biul. no. 22 [in Russian].
8. *Doroshenko, V.S., Berdyev, K.Kh.* (2014). Calculation of a conveyor for drying colored foam models of serial casting. *Lit'e Ukrainy*, no. 7, P. 13 [in Russian].
9. *Doroshenko, V.S., Berdyev, K.Kh.* (2011). Continuous conveyors for casting by one-off models in sandy forms, hardened under the influence of vacuum. *Casting processes*, no. 5, pp. 49–56 [in Russian].
10. *Bobro, Yu.G.* (2018). Metal science of foundry alloys. Achievements and problems. *Biблиотека liteishchika*, no. 3, pp. 9–15 [in Russian].
11. *Altena, H., Buchner, K.* (2016). Process technology and plant design for bainite hardening. *La Metallurgia Italiana*, no. 3, pp. 23–26 [in English].
12. *Altena, H., Schrank, F.* (2007). Modern gas-carburizing technology for the automotive industry. *Heat treating progress*, March / April, pp. 17–22 [in English].

13. Doroshenko, V.S., Shinskiy, V.O. (2018). A method of manufacturing castings from bainite or ausferitic nodular cast iron. Patent UA, no. 123731. Opubl. 12.03.2018, Biul. no. 5 [in Russian].
14. Doroshenko, V.S., Shinskiy, V.O. (2018). A method of manufacturing castings. Zaiavka u201807139 Ukraina, ot 25.06.2018. Reshenie o vydache patenta ot 1.10.2018 [in Russian].
15. Shinskiy O.I., Doroshenko, V.S. (2013). Method of forming. Patent UA, no. 82837. Opubl. 12.08. 2013, Biul. no. 15 [in Russian].
16. Doroshenko, V.S., Shinskiy, V.O. (2018). A method of manufacturing castings from bainitic or ausferitic iron-carbon alloy (iron, steel). Zaiavka u201807117 Ukraina, ot 25.06.2018. Reshenie o vydache patenta ot 06.11.2018 [in Russian].

Received 15.01.2019

Анотація

В.С. Дорошенко, канд. техн. наук, ст. наук. співр., ст. наук. співр. відділу фізико-хімії ливарних процесів, e-mail: doro55v@gmail.com

*Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України,
Київ, Україна*

Концепція роторно-конвеєрного комплексу для лиття за моделями, що газифікуються, та термообробки виливків

Роторно-конвеєрні комплекси (РКК) забезпечують поєднання транспортних і технологічних операцій ливарних процесів. Такі конвеєрні технології лиття в піщані форми дозволяють отримувати заготовки високої якості і сприяють автоматизації виробничого процесу. Згідно з концепцією проф. О.І. Шинського щодо модульної комплектації високопродуктивного, екологічно безпечного, автоматизованого обладнання і РКК на основі нових технологій з використанням фізично зв'язаних розрідженням і кріотехнологією формувальних матеріалів, виконано поєднання лінії для виробництва разових пінополістирольних моделей з роторними формувальними модулями, заливальним конвеєром і термічною піччю. Включення в РКК кільцевої термічної печі, в якості одного з роторних транспортно-технологічних конвеєрних модулів, дозволяє виконати термообробку виливків для отримання бейнітних структур металу з високими експлуатаційними характеристиками, що дає підставу назвати такий РКК ливарно-термічним. Описана концепція поєднання технології лиття за моделями, що газифікуються, застосування вакуумованих форм з піском без в'язучого, вибивання виливків у гарячому стані і, оминаючи перлітне перетворення для залізобетонних сплавів, ізотермічного їх гартування (аустемперінга) дозволяє використовувати новітні наукові і прикладні знання в області синтезу конструкційних і спеціальних чавунів і сталей з високими механічними властивостями. Описаний РКК забезпечить зростання продуктивності виробництва, скорочення його енерго- і трудомісткості, виробничих площ, відповідає сучасному високотехнологічному устаткуванню, проектування якого засноване як на вченні акад. Л.Н. Кошкіна, так і на науково-технологічних розробках і патентах ФТІМС НАН України.

Ключові слова

Роторно-конвеєрний комплекс, лиття за моделями, що газифікуються, виливок, модульна конструкція, високоміцний чавун, термообробка, бейнітна структура, ізотермічне гартування.

Summary

V.S. Doroshenko, Candidate of Engineering Sciences, Senior Researcher, Senior Researcher at the Department of Physics and Chemistry casting processes, e-mail: doro55v@gmail.com

*Physico-technological Institute of Metals and Alloys of the NAS of Ukraine,
Kyiv, Ukraine*

The concept of a rotor-conveyor complex for Lost Foam Casting process and heat treatment of metal castings

Rotor conveyor complexes (RCC) provide a combination of transport and technological operations of metal casting processes. Such conveyor of sand casting technologies allow obtaining high quality blanks and help automatization the production process. Following the concept of prof. O.I. Shinskiy about modular configuration of highly productive, environmentally friendly, automated equipment and RCC based on new technologies using physically related dilution and cryotechnologies of molding materials, the line for the production of single foam polystyrene patterns with rotary molding modules, casting

conveyor and thermal furnace was combined. The inclusion in the RCC of the annular heat-treatment furnace, as one of the rotary transport-technological conveyor modules, allows heat treatment of the casting to produce bainitic metal structures with high performance characteristics, which gives grounds to call this RCC as foundry-thermal. The described concept of combining casting technology using gasified patterns, using vacuum molds with sand without a binder, knocking out hot castings and, bypassing pearlite transformation for iron-carbon alloys, isothermal hardening (austempering), allows you to use the latest scientific and applied knowledge in the field of structural and special synthesis cast iron and steel with high mechanical properties. The described RCC will ensure an increase in the productivity of production, a reduction in its energy and labor intensity, production space, corresponds to modern high-tech equipment, the design of which is based on the teaching of Acad. L.N. Koshkin, as well as on the scientific and technological developments and patents of the PTIMA NAS of Ukraine.

Keywords

Rotor-conveyor complex, Lost Foam Casting, metal casting, modular construction, high-strength cast iron, heat treatment, bainite structure, isothermal hardening, austempering.

Исследование процессов дифференциации структуры чугунных отливок методом компьютерного моделирования

Представлены основные варианты повышения эксплуатационного ресурса деталей высоконагруженных рабочих органов машин и механизмов измельчения, размола и другой обработки минерального сырья, работающих в условиях абразивного и ударно-абразивного износа, и пути улучшения технологий их изготовления, которые основываются на использовании свойств такого класса материалов, как биметаллы. Показана эффективность применения современных методов компьютерного моделирования процессов кристаллизации отливок. Установлена возможность использования данных, полученных средствами компьютерного моделирования, для определения скоростей охлаждения в любой точке отливки. На примере высокопрочного чугуна с шаровидной формой графита, полученного путем сфероидизирующего модифицирования в реакционной камере литейной формы, с известной критической скоростью охлаждения, превышение которой ведет к изменению пути его кристаллизации со стабильной системы на метастабильную и, как следствие, к отбелу, произведены расчеты, которые позволяют прогнозировать глубину отбеленного слоя чугуна отливки в зависимости от заданных технологических факторов процесса литья. Установлено, что использование полученных данных моделирования и расчетов может быть применено для задания необходимой глубины рабочего отбеленного слоя чугуна деталей на этапе их изготовления, что, в свою очередь, обеспечит получение более оптимизированных эксплуатационных свойств. В работе показаны результаты экспериментальных исследований технологии получения отливок, которые сочетают в себе структуру высокопрочного чугуна в материале основы и белого чугуна в их рабочей части. Проведено сравнение результатов этих исследований с результатами компьютерного моделирования и расчетов, которое подтверждает их сходимость.

Ключевые слова: биметаллические отливки, абразивный и ударно-абразивный износ, двухслойные чугуны отливки, литье в песчано-глинистые формы, компьютерное моделирование, кривая охлаждения, внешний холодильник, глубина отбела, высокопрочный чугун, критическая скорость охлаждения.

В отраслях промышленности, связанных с добычей, транспортировкой, обработкой абразивных материалов широко используются машины и механизмы, детали которых работают в условиях абразивного и ударно-абразивного износа. Исследование процессов дифференциации структуры чугунных отливок методом компьютерного моделирования позволяет решать актуальную задачу для промышленности Украины по разработке новых и улучшению существующих способов получения такого рода деталей.

Из анализа литературных источников [1–3] установлено, что экономически выгодным является изготовление таких деталей из биметаллов. Например, по данным работы [1], использование биметаллов для изготовления высоконагруженных рабочих органов механизмов измельчения, размола и другой обработки минерального сырья увеличивает их технический ресурс в 2–4 раза. При этом в качестве материала основы применяют низколегированные, углеродистые стали или чугуны, что позволяет сократить затраты на использование высоколегированных сплавов.

Однако, технологии изготовления биметаллических отливок достаточно сложны и требуют повышенных затрат на подготовку производства для одновременного приготовления двух расплавов различного химического состава, особого внимания к переходной зоне, где материал основы переходит в рабочий слой, поскольку наличие в ней дефектов влияет на эксплуатационные показатели биметаллических деталей.

Использование одного исходного материала при изменении условий его кристаллизации позволяет обеспечивать различные свойства в отливке и ликвидирует вышеуказанные недостатки. Таким материалом является чугун, структура и механические свойства которого существенно меняются в зависимости от его химического состава, использования операций внепечной обработки и регулирования скорости охлаждения.

Для проведения моделирования и исследований в работе использовали способ получения двухслойных чугуна отливок [4], сущность которого заключается в заливке расплава в литейную форму, где он проходит внутриформенную обработку и заполняет полость формы. С целью обеспечения получения дифференциации слоев в полость формы предварительно установлен внешний холодильник.

Для работы в условиях абразивного и ударно-абразивного износа материалом основы может служить высокопрочный чугун с шаровидным графитом, а материалом рабочей части детали – отбеленный чугун с включениями структурно-свободного цементита.

Использование сфероидизирующего модификатора при внутриформенном модифицировании обеспечивает образование в отливке слоя из высокопрочного чугуна в качестве материала основы, а применение внешнего холодильника способствует образованию отбеленного рабочего слоя. При этом глубину данного слоя можно регулировать для обеспечения оптимального эксплуатационного ресурса отливки.

Целью работы было установление влияния технологических факторов процесса литья (толщины сечения отливки и толщины сечения внешнего холодильника) на глубину отбеленного слоя чугуной отливки. Материалом холодильника был выбран серый чугун, вследствие его лучших, по сравнению со сталью, теплофизических свойств.

Известно, что для чугунов существует критическая скорость охлаждения, при достижении которой меняется характер кристаллизации чугуна с кристаллизации по стабильной системе с выделением графита в свободном состоянии, на кристаллизацию по метастабильной системе с включениями структурно-свободного цементита или цементита ледебурита. Для определения глубины отбеленного слоя необходимо установить скорости охлаждения по сечению отливки и сравнить их со значениями критической скорости для конкретного сплава.

Для проведения исследований был выбран метод компьютерного моделирования, использование которого позволяет четко зафиксировать технологические параметры процесса заливки, имитировать условия заливки, кристаллизации и охлаждения расплава, за-

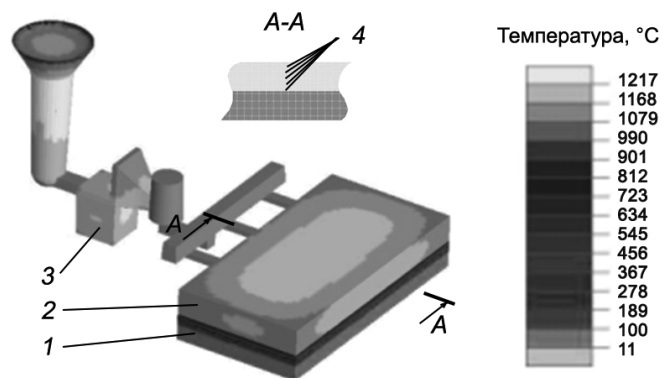


Рис. 1. Схема моделирования процесса заливки, кристаллизации и охлаждения чугуной отливки: 1 – внешний холодильник; 2 – отливка; 3 – реакционная камера; 4 – термопары

писать кривые охлаждения в любой точке отливки и провести необходимое количество циклов моделирования при минимальных затратах.

Модель отливки, как и модель внешнего холодильника, выбрали размерами 240×120 мм, что обеспечило исключение влияния граничных условий на

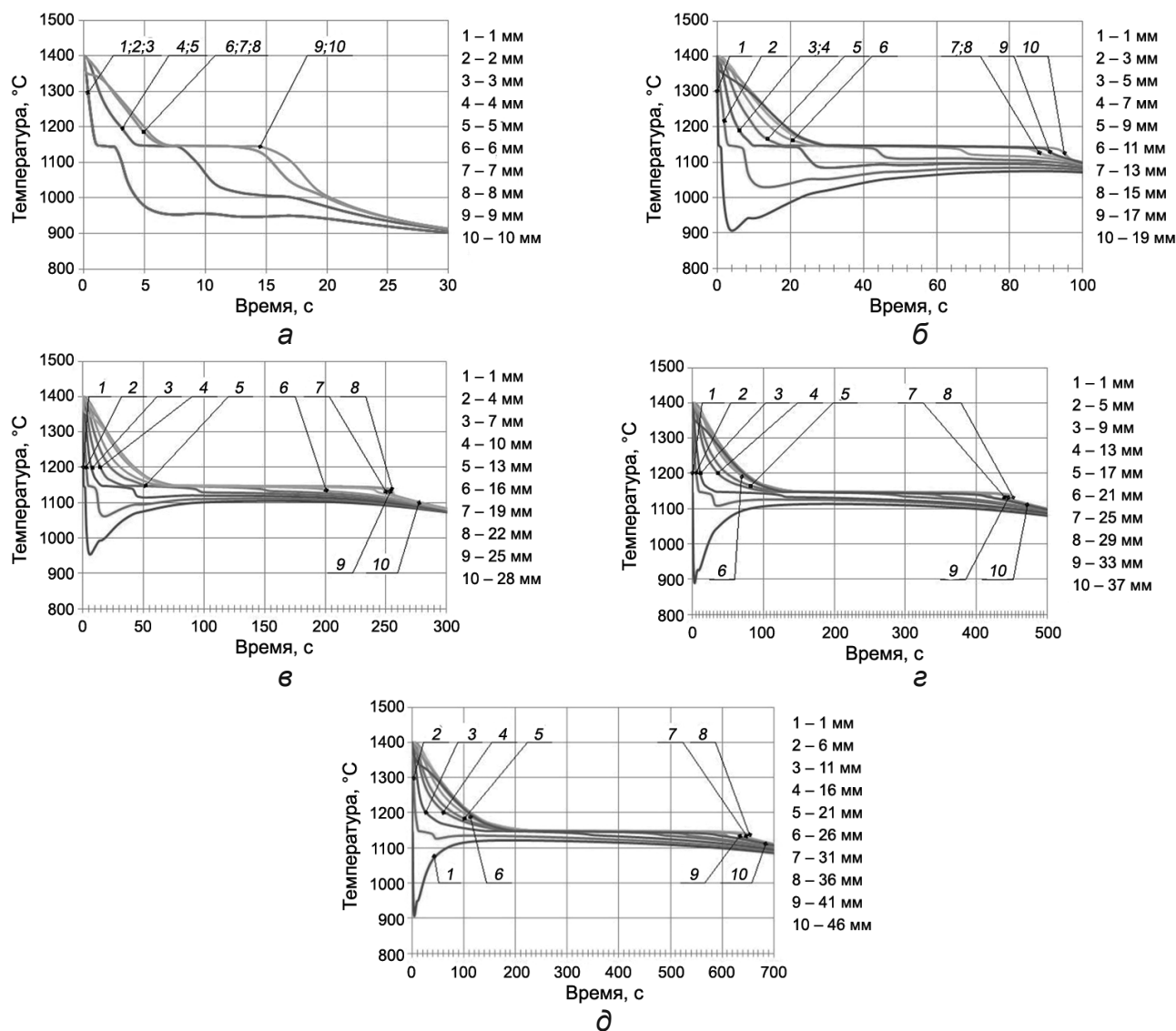


Рис. 2. Кривые охлаждения, полученные по результатам моделирования в отливках с толщинами стенок: а – 10 мм; б – 20 мм; в – 30 мм; г – 40 мм; д – 50 мм с использованием внешнего холодильника толщиной 10 мм на разном расстоянии термопар от него

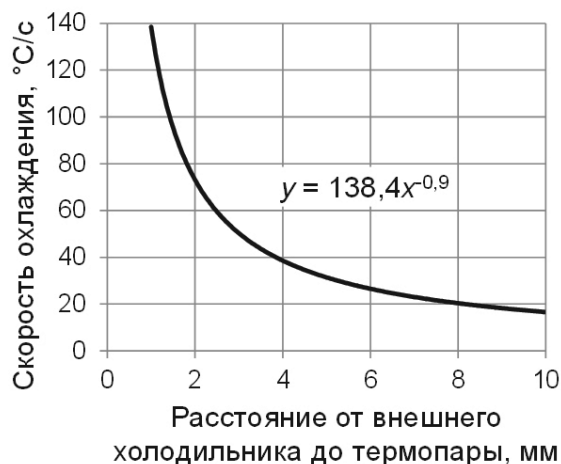
скорость охлаждения ее центральной части (рис. 1), в которой проводили запись кривых охлаждения. Толщины сечения моделей меняли в диапазоне от 10 до 50 мм с шагом 10 мм. Остальные технологические параметры процесса заливки при моделировании выбраны как для типичного процесса производства чугуновых отливок в формах из песчано-глинистой смеси с учетом использования метода внутриформенного сфероидизирующего модифицирования чугуна:

- температура заливки расплава – 1400 °С;
- материал формы – сухая песчано-глинистая смесь;

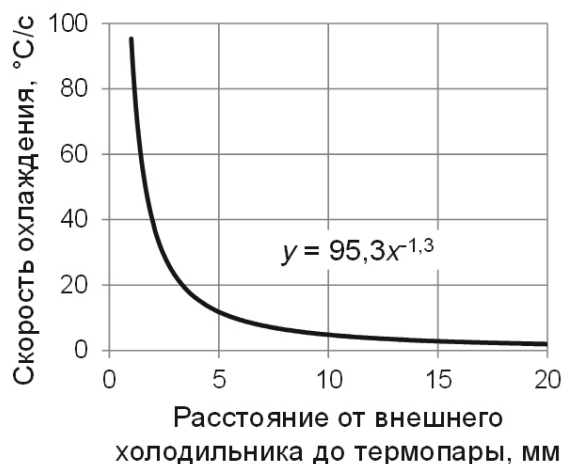
– материал холодильника – серый чугун марки СЧ 20.

При моделировании процесса кристаллизации отливки наблюдали за кривыми охлаждения, которые записывались с помощью термопар (п. 4, рис. 1), расположенных по центру модели отливки и распределенных равномерно по всей толщине ее сечения с шагом 1 мм.

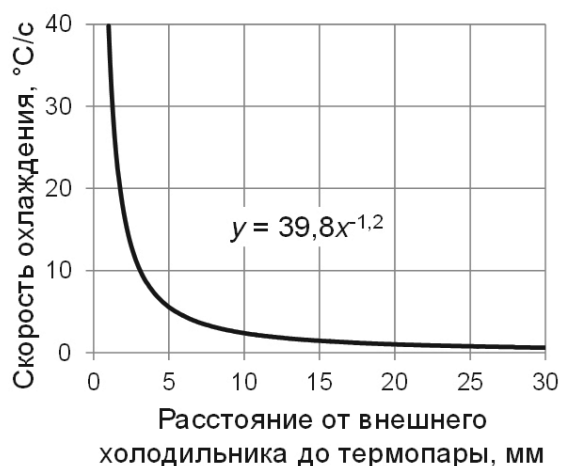
В результате моделирования был получен массив данных в виде кривых охлаждения для каждой термопары.



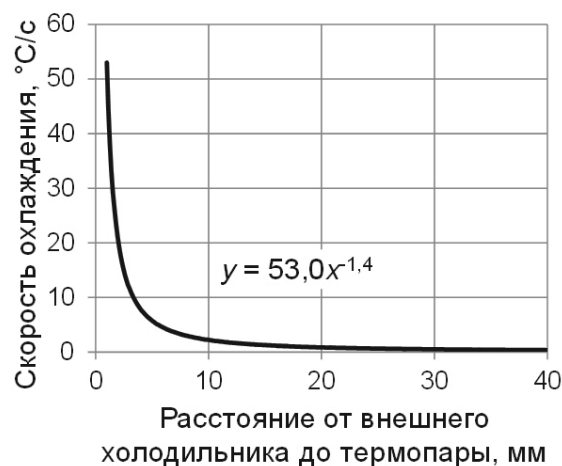
а



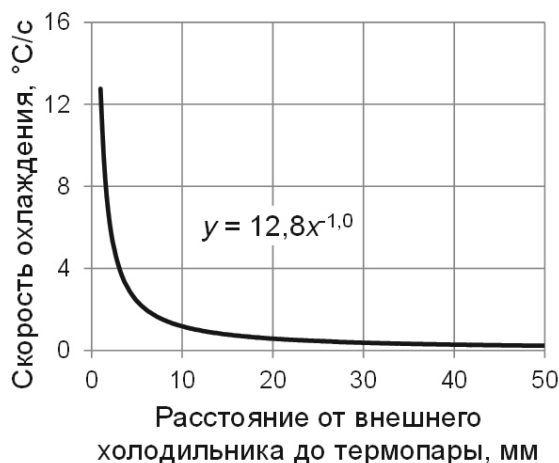
б



в



г



д

Рис. 3. Зависимости скоростей охлаждения в отливках с толщинами стенок: а – 10 мм; б – 20 мм; в – 30 мм; г – 40 мм; д – 50 мм с использованием внешнего холодильника толщиной 10 мм

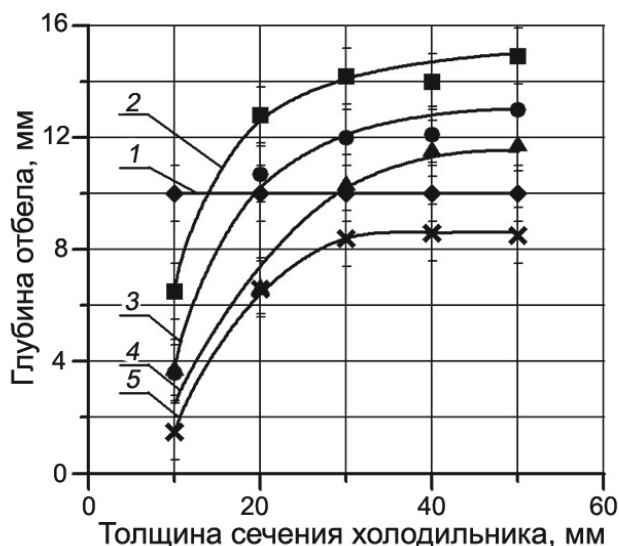


Рис. 4. Влияние толщины сечения холодильника на глубину отбела отливки для отливок толщиной: 1 – 10 мм; 2 – 20 мм; 3 – 30 мм; 4 – 40 мм; 5 – 50 мм

Из общего характера изменения кривых охлаждения (рис. 2) можно сделать вывод, что время кристаллизации в точках отливки, в которых были установлены термопары, увеличивается с увеличением расстояния от термопары к внешнему холодильнику. Таким образом, например, для начальных условий моделирования, при которых толщина модели и толщина внешнего холодильника составляла 10 мм, время кристаллизации в точках, в которых было установлено термопары, меняется от 3 с на минимальном расстоянии от внешнего холодильника до 15 с – на максимальном.

Следовательно, при увеличении расстояния от внешнего холодильника до точки отливки, в которой было установлено термопару, увеличивается продолжительность кристаллизации соответствующей точки отливки. Увеличение продолжительности кристаллизации приводит к уменьшению скорости охлаждения, которая, в свою очередь, будет влиять на формирование структуры чугуновой отливки.

Скорость охлаждения в каждой точке отливки, в которой было установлено термопару, определяли по отношению температурного интервала кристаллизации сплава ко времени его кристаллизации. Отдельно для каждого смоделированного варианта приведенным выше способом была вычислена скорость охлаждения в каждой точке, в которой было установлено термопару. По полученным значениям скоростей охлаждения были построены графики их изменения, в зависимости от положения термопар по отношению к внешнему холодильнику, и проведена аппроксимация полученных кривых степенной функцией (рис. 3).

Из анализа литературы [5] установлено, что для чугуна, который был выбран для компьютерного моделирования и исследования, с химическим составом близким к эвтектическому, критическая скорость охлаждения, при достижении и превышении которой происходит кристаллизация с отбелом, составляет 8,3 °C/с. При меньших скоростях охлаждения отливка кристаллизуется по стабильной системе без отбела.

По результатам расчетов, для отливки толщиной 10 мм (рис. 3, а) скорость охлаждения в поперечном

сечении изменяется в пределах от 140 до 20 °C/с. При этом толщина холодильника в пределах от 10 до 50 мм на смену скоростей охлаждения существенно не влияет. Поскольку приведенные скорости охлаждения превышают критическую, то отливка кристаллизуется со сквозным отбелом.

Для отливок с толщинами стенок 20, 30, 40 и 50 мм (рис. 3, б–д) скорость охлаждения в поперечном сечении изменяется в зависимости от толщины отливки и холодильника. По полученным данным изменения скоростей охлаждения в поперечном сечении отливки и значению критической скорости охлаждения для данного чугуна, было определено глубину, на которую отливка кристаллизуется с отбелом по всем смоделированным вариантам, и установлены зависимости влияния толщины холодильника и отливки на глубину отбела (рис. 4).

Для проверки результатов компьютерного моделирования были проведены исследования, в результате которых были получены отливки, которые сочетают в себе структуру высокопрочного чугуна в материале основы и белого чугуна в его рабочей части.

Анализ результатов исследований показал, что после сфероидизирующего модифицирования исходного чугуна, отливка толщиной 10 мм кристаллизуется монолитной со сквозным отбелом с перлитно-цементитной микроструктурой, среди которых выделяются мелкодисперсные включения графита шаровидной формы.

В сечениях отливок толщиной от 20 до 50 мм наблюдается дифференциация структуры и свойств между их противоположными поверхностями. При этом слой отливки из отбеленного чугуна со стороны внешнего холодильника формируется толщиной около 10 мм. В таких же сечениях отливок со стороны песчано-глинистой формы сплав на толщину 10–40 мм кристаллизовался со светло-серым изломом, характерным для высокопрочного чугуна. Микроструктура чугуна состоит из графита шаровидной формы в перлитно-ферритной металлической матрице, без эвтектических карбидов железа.

Таким образом, результаты, полученные натурными экспериментами, подтверждают результаты моделирования, использование которых позволяет прогнозировать толщину рабочего слоя в отливке для конкретных условий его эксплуатации, тем самым увеличивая ее технический ресурс.

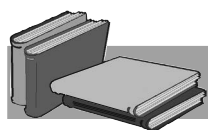
Выводы

Проведено моделирование процессов кристаллизации отливки по технологии изготовления чугуновых отливок с дифференцированными свойствами с использованием внешнего холодильника и метода внутриформенного модифицирования. По результатам моделирования, установлены зависимости влияния технологических факторов процесса литья на кристаллизацию отливки. На примере отдельного материала спрогнозировано образование в отливках с толщинами поперечного сечения от 10 до 50 мм рабочего слоя отбеленного чугуна определенной толщины для его эксплуатации в условиях абразивного

и ударно-абразивного износа, что позволяет обеспечить оптимальный эксплуатационный ресурс отдельно взятых отливок на стадии их изготовления.

Результаты моделирования подтверждены результатами исследования, и установлена их целесо-

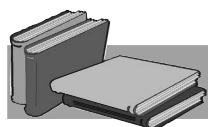
образность при выборе технологических факторов процесса литья.



ЛИТЕРАТУРА

1. Каричковский И.Н., Шинский И.О., Клименко Л.М. Способы повышения технического ресурса, эксплуатационной надежности рабочих органов дробильно-размольного оборудования // *Металл и литье Украины*. – 2009. – № 7-8. – С. 56–60.
2. Фесенко М.А. Модифицирование чугуна в литейной форме карбидостабилизирующими добавками // *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії*. – 2015. – № 1(34). – С. 88–95.
3. Костенко Г.Д., Пеликан О.А., Костенко Д.Г. Износостойкие биметаллические отливки на основе сплавов железа // *Металл и литье Украины*. – 1998. – № 9-10. – С. 30–33.
4. Фесенко М.А., Фесенко К.В., Верховлюк А.М., Лук'яненко І.В. Спосіб виробництва двошарових чавунних виливків з робочою зносостійкістю та монтажною в'язкою частинами для роботи в умовах ударно-абразивного зносу // *Scientific Journal "ScienceRise"*. – 2016. – № 7/2(24). – С. 34–40.
5. Бубликов В.Б., Ясинский А.А., Сыропоршнев Л.Н., Козак Д.С., Бачинский Ю.Д. Влияние содержания кремния и скорости охлаждения на образование отбела в отливках из модифицированного в ковше высокопрочного чугуна // *Процессы литья*. – 2009. – № 4. – С. 17–24.

Поступила 18.02.2019



REFERENCES

1. Karichkovsky, P.N., Shinsky, I.O., Klymenko, L.M. (2009). Methods of increasing of the technical resource, operation reliability of the working parts of crushing-and-milling equipment. *Metall i lit'e Ukrainy*. no. 7–8, pp. 56–60 [in Russian].
2. Fesenko, M.A. (2015). Inmold cast iron modification with carbide stabilizing additives. *Visnyk Donbas'koi derzhavnoi mashynobudivnoi akademii. Herald of the Donbass State Engineering Academy*, no. 1 (34), pp. 88–95 [in Russian].
3. Kostenko, G.D., Pelikan, O.A., Kostenko, D.G. (1998). Wear-resistant bimetallic castings based on iron alloys. *Metall i lit'e Ukrainy*, no. 9–10, pp. 30–33 [in Russian].
4. Fesenko, M.A., Fesenko, K.V., Verhovliuk, A.M., Luk'ianenko, I.V. (2016). Method of production of two-layer cast-iron castings with working durability and mounting binder parts for use in shock-abrasive wear. *Scientific Journal "ScienceRise"*, no. 7/2 (24), pp. 34–40 [in Ukrainian].
5. Bublikov, V.B., Yasinskii, A.A., Syroporshnev, L.N., Kozak, D.S., Bachinskii, Yu.D. (2009). Influence of silicon content and cooling rate on chill formation in castings from high-strength cast iron modified in a ladle. *Casting processes*, no. 4, pp. 17–24 [in Russian].

Received 18.02.2019

Анотація

І.В. Лук'яненко, асистент, e-mail: lukianenkoiv@gmail.com,
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1043-9688>, ResearcherID: J-7294-2017

Національний технічний університет України «Київський
політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

Дослідження процесів диференціації структури чавунних виливків методом комп'ютерного моделювання

Представлено основні варіанти підвищення експлуатаційного ресурсу деталей високонавантажених робочих органів машин і механізмів подрібнення, розмелювання та іншої обробки мінеральної сировини, що працюють в умовах абразивного та ударно-абразивного зносу, і шляхи поліпшення технологій їх виготовлення, які ґрунтуються на використанні властивостей такого класу матеріалів, як біметали. Показано ефективність застосування сучасних методів комп'ютерного моделювання процесів кристалізації виливків. Встановлено можливість використання даних, отриманих засобами комп'ютерного моделювання, для визначення швидкостей охолодження в будь-якій точці виливка. На прикладі високоміцного чавуну з кулястою формою графіту, отриманого шляхом сфероїдизувального модифікування в реакційній камері ливарної форми, з відомою критичною швидкістю охолодження, перевищення якої

призводить до зміни шляху його кристалізації зі стабільної системи на метастабільну і, як наслідок, до відбілу, виконано розрахунки, які дозволяють прогнозувати глибину відбіленого шару чавунного виливка в залежності від заданих технологічних факторів процесу лиття. Дано пояснення, що використання отриманих даних моделювання та розрахунків може бути застосовано для задання необхідної глибини робочого відбіленого шару чавунних деталей на етапі їхнього виготовлення, що, в свою чергу, забезпечить отримання більш оптимізованих експлуатаційних властивостей. У роботі показано результати експериментальних досліджень технології одержання виливків, які поєднують в собі структуру високоміцного чавуну в матеріалі основи і білого чавуну в їхній робочій частині. Проведено порівняння результатів цих досліджень з результатами комп'ютерного моделювання та розрахунків, яке підтверджує їх збіжність.

Ключові слова

Біметалеві виливки, абразивний та ударно-абразивний знос, двошарові чавунні виливки, лиття в піщано-глинисті форми, комп'ютерне моделювання, крива охолодження, зовнішній холодильник, глибина вибілення, високоміцний чавун, критична швидкість охолодження.

Summary

I.V. Lukianenko, assistant, e-mail: lukianenkoiv@gmail.com,
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1043-9688>, ResearcherID: J-7294-2017

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine

Study of processes of structure differentiation of cast-iron castings by computer simulation

The main options for improving the operational life of parts of high-loaded working bodies of machines and mechanisms of grinding and other processing of mineral raw materials, working in conditions of abrasive and impact-abrasive wear and ways to improve their production technologies are presented, which are based on using properties of such a class of materials as bimetals. The effectiveness of the use of modern methods of computer simulation of castings crystallization is shown. The possibility of using data obtained by computer simulation to determine the cooling rate at any point of the casting has been established. Using the example of high-strength cast iron with spherical shape of graphite, obtained by spheroidizing modification in the reaction chamber of a mold with a known critical cooling rate, exceeding of which leads to a change in its crystallization path from a stable system to a metastable and, as a result, to chilling, calculations are made that allow us to predict the depth of the chilled cast iron layer, depending on the given technological factors of the casting process. An explanation is given that the use of the obtained data of modeling and calculations can be applied to specify the required depth of the working chilled layer of cast iron parts at the stage of their production, which, in turn, will provide more optimized performance properties. The paper shows the results of experimental studies of the technology for producing castings, which combine the structure of high-strength cast iron in the base material and white cast iron in their working part. A comparison of the results of these studies with the results of computer simulation and calculations is made, which confirms their convergence.

Keywords

Bimetallic castings, abrasive and impact-abrasive wear, two-layer cast iron castings, green sand mold casting, computer simulation, cooling curve, external chiller, chill depth, high-strength cast iron, critical cooling rate.

В.В. Ясюков, канд. техн. наук, приват-профессор, доц. кафедры технологии и управления литейными процессами,
e-mail: odessa810@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6453-5712>

Т.В. Лысенко, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой технологии и управления литейными процессами,
e-mail: tvl12odessa@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3183-963x>

О.И. Воронова, приват-доцент, ст. преподаватель кафедры технологии и управления литейными процессами,
e-mail: olgaliptuga@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2976-0794>

Л.И. Солоненко, канд. техн. наук, ст. преподаватель кафедры технологии и управления литейными процессами,,
e-mail: solonenkoli14@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2092-8044>

Одесский национальный политехнический университет, Одесса, Украина

Анализ способов повышения эффективности литейного производства

Технологический выход годного отливок (ТВГ) и коэффициент использования металла литых деталей (КИМ) являются индикативными показателями уровня развития литейного производства. Указанные аспекты направления дальнейшего развития литейного производства рассматриваются в сфере создания новых и совершенствования существующих технологических процессов формообразования, плавки и способов литья. Наиболее острыми проблемами в решении этих задач являются следующие: снижение массы литых деталей за счет тщательной конструкторско-технологической проработки геометрии детали, выбора сплава с учетом особенностей литейной технологии, использования компьютерного моделирования, организации гидродинамического процесса заполнения формы жидким металлом с учетом формирования потоков непосредственно в форме, интенсификации работы прибылей, повышения свойств сплавов в процессе плавки; повышение геометрической точности отливок путем внедрения новых методов формообразования, формовочных материалов; организационные мероприятия по снижению потерь металла в литейных цехах; широкое внедрение термической обработки отливок различными способами для различных сплавов; расширение номенклатуры композиционного литья, позволяющего синтезировать отдельные элементы отливки, отвечающие требованиям эксплуатационной надежности; повышение профессионального уровня специалистов, работающих непосредственно в цехах, в НИИ, ВУЗах, НАН Украины; создание имиджа привлекательности профессии литейщика улучшением условий труда, экологической и санитарно-гигиенической ситуации за счет применения новых материалов и технологий; активное внедрение наноматериалов в технологические процессы, позволяющее резко повысить механические и служебные свойства отливок; синтез новых, более эффективных производственных процессов на базе аддитивных технологий с использованием 3D-принтеров. Рассмотренные технологические процессы решают эту двуединую задачу.

Ключевые слова: технологический выход годного отливок, коэффициент использования металла литых деталей, эксплуатационная надежность литой детали, геометрическая точность литой детали, литейное производство.

Актуальность работы. Одной из важнейших областей техники, определяющей уровень металлоемкости национального дохода, является литейное производство, которое по праву считается основной заготовительной базой машиностроения. Кроме литейного производства базовыми производителями заготовок деталей являютсяковка, штамповка, сварка, общая доля которых составляет около 35 % объема. Поэтому существенное уменьшение массы литых деталей, повышение эксплуатационной надежности литья, в первую очередь для транспортных средств, является актуальной задачей. Резервы в этом направлении весьма значительны: современные литые конструкции в Украине превышают расчетные в 1,5–2 раза, в то время как в Западной Европе этот показатель составляет 1,3–1,5 раза [1]. При этом, несмотря на достаточно высокий коэффициент использования металла, представляющий отношение массы готовой детали к расходу

металла на исходную заготовку в отливках (0,53 против 0,42 при ковке, 0,43 при штамповке и 0,55 при сварке), ТВГ по-прежнему низкий (69 % против 88 % при ковке, 82 % при штамповке, 81 % при сварке) и нестабильный: в зависимости от сплава и конфигурации отливки колеблется в пределах 45–80 % от переплавленного металла. В этой связи концепция совершенствования литейного производства должна отражать решение двуединой задачи: с одной стороны, обеспечить геометрическую точность и эксплуатационную надежность литой детали с минимальной массой и максимальным КИМ; с другой стороны, повысить выход годного отливок технологическими и организационными методами. Здесь следует учитывать не только литейный передел, но и последующую механическую обработку отливок.

Постановка задачи. Указанные аспекты направления дальнейшего развития литейного производства рассматриваются в сфере создания новых и

совершенствования существующих технологических процессов формообразования, плавки и способов литья. Показателями эффективности должны быть: производительность труда, условия и привлекательность работы литейщиков. Показателями качества работы – заданное качество отливок. Эти показатели могут быть достигнуты при наличии научно-технического потенциала технологии литья, который складывается из деятельности научных коллективов различных НИИ, вузовских ученых и производителей.

Целью работы является обобщение существующего научно-производственного и организационного опыта повышения КИМ и ТВГ литья, а также использование новых технологических процессов, направленных на решение этой задачи.

Сущность и методы исследования. Анализ существующих производственных и синтез новых, более эффективных процессов, должен базироваться на содружестве конструктора и технолога-литейщика, которые, зная характерные особенности литых деталей (пониженная прочность, различные механические показатели в разных участках отливки, склонность к образованию дефектов и напряжений), должны учитывать их в конструкции и технологии литья. Сюда относятся:

- 1) выбор толщины стенки деталей, обладающих неодинаковой прочностью в поперечном сечении из-за различия в условиях кристаллизации (рис. 1) [2];
- 2) необходимая жесткость и прочность при минимальной толщине стенки, а также снижение массы. Обеспечивается ребрением, приданием детали выпуклых, сводчатых, сферических и тому подобных форм;
- 3) геометрия отливки. Должна обеспечивать беспрепятственное извлечение модели из формы и стержня из стержневого ящика;
- 4) ужесточение величины формовочных уклонов. Должно выполняться за счет более широкого внедрения конструктивных уклонов и наладки формовочного и стержневого оборудования (перекосы, горизонтальное смещение полуформ, контакт соударяющихся поверхностей и т. д.);
- 5) уменьшение массы отливок, например, замена серого чугуна с пластинчатым графитом на высокопрочный с шаровидным графитом;
- 6) снижение внутренних напряжений в стенках отливки за счет изменения конструкции: в коробчатой

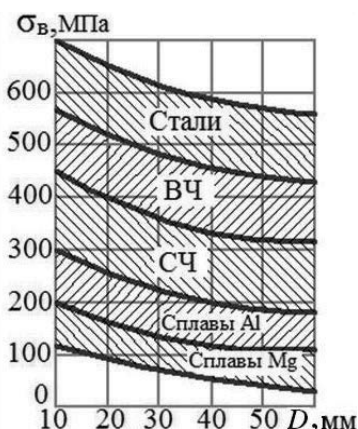


Рис. 1. Зависимость прочности сплавов от толщины стенки отливки; D – толщина стенки, мм

отливке (рис. 2, а) с внутренней перегородкой к концу остывания возникают двухосные напряжения – растяжения в перегородке и реактивные напряжения сжатия в стенках. Для уменьшения усадочных напряжений целесообразно вводить, например, усадочные буфера (гофрированная стенка) (рис. 2, б) или делать криволинейную перегородку (рис. 2, в).

Уменьшение усадочных напряжений в отливках из низкоуглеродистых сталей, например, стали 20ГЛ, применяемой для деталей вагонного литья [3], является важным фактором, влияющим на образование горячих трещин. В процессе эксплуатации эти детали работают в области переменных циклических и динамических нагрузок; наличие горячих трещин в изотропном литом материале, который обладает повышенной сопротивляемостью разрушениям при разновекторном объемном нагружении благодаря геометрии отливок с развитыми внутренними полостями, приводит к разрушению и авариям на железной дороге. Для определения усадочных напряжений в коробчатой отливке примем, что перегородка (рис. 2, а) остывает позднее стенок отливки, то есть $S_1 > S_2$. Расчет ограничим рассмотрением деформаций по оси x . К концу остывания перегородка должна укоротиться на величину $\lambda_1 = \alpha l(t_1 - t_0)$, а стенки на величину $\lambda_2 = \alpha l(t_2 - t_0)$, где l – длина стенок по оси x ; α – коэффициент линейного расширения; t_0 – конечная температура остывания отливки; t_1 – температура перехода металла перегородки из пластичного в упругое состояние; t_2 – температура стенки отливки, при которой металл уже находится в упругом

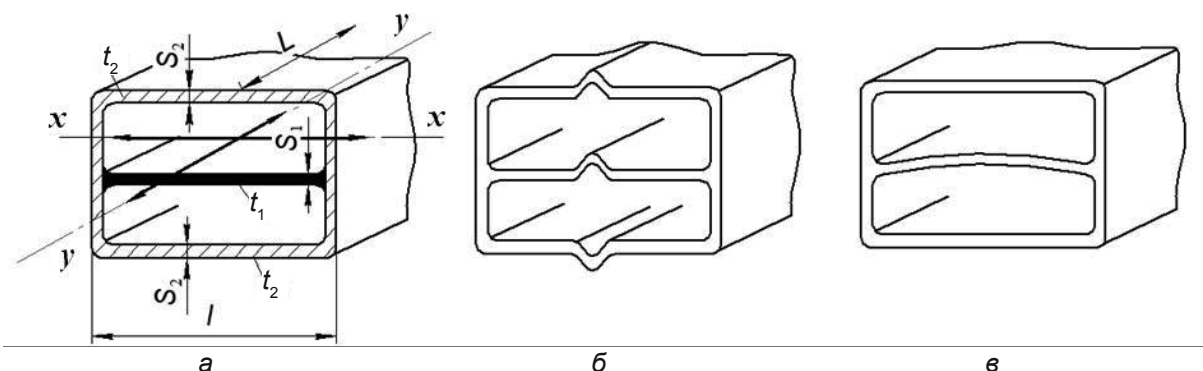


Рис. 2. Возникновение усадочных напряжений в отливках: а – схема; б – усадочные буфера (гофрированная стенка); в – криволинейная перегородка

состоянии. При дальнейшем охлаждении металл перегородки подвергается растяжению, а стенки – сжатию. Разность изменения размеров $\Delta l = l_1 - l_2 = \alpha l(t_1 - t_2)$ определяет напряжения в отливке, то есть участки отливки, остывающие раньше, подвергаются сжатию, а участки, остывающие позднее, – растяжению. Согласно закону Гука:

$$\Delta l = \alpha l(t_1 - t_2) = \frac{Pl}{EF_1} + \frac{Pl}{EF_2}, \quad (1)$$

где P – сила, возникающая в системе; E – среднее значение модуля нормальной упругости материала в интервале температур $t_1 - t_0$; F_1 и F_2 – площади сечений соответственно перегородки и стенок, нормальных к оси x ($F_1 = S_1L$; $F_2 = S_2L$).

Сила:

$$P = \frac{E\alpha(t_1 - t_2)}{\frac{1}{F_1} + \frac{1}{F_2}}. \quad (2)$$

Напряжение растяжения в перегородке:

$$\sigma_1 = \frac{P}{F_1} = \frac{E\alpha(t_1 - t_2)}{1 + \frac{F_1}{F_2}}. \quad (3)$$

Напряжение сжатия в стенках:

$$\sigma_2 = \frac{P}{F_2} = \frac{E\alpha(t_1 - t_2)}{1 + \frac{F_2}{F_1}}. \quad (4)$$

Отношение напряжений:

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \frac{F_2}{F_1}. \quad (5)$$

Таким образом, основной причиной усадочных напряжений является различие температур элементов отливки. Если $t_1 = t_2$, то напряжения равны нулю. На этом основан принцип одновременного затвердевания отливки, который закладывается при разработке технологии и обеспечивается активным управлением скорости охлаждения [4]. Этот метод позволяет снижать массу отливок без ущерба эксплуатационной надежности. В противовес этому методу для отливок с пониженными литейными свойствами применяется способ направленного затвердевания, при котором стенки отливки прогрессивно утолщаются сверху. При этом нижние сечения питаются жидким металлом из расположенных выше сечений; недостатками этого способа являются утолщение отливки и увеличенный расход металла.

Приведенный выше расчет напряжений (в качестве примера) может использоваться для отливок простой формы и небольших габаритов со свободной усадкой; в случае крупногабаритных отливок сложной конфигурации с затрудненной усадкой целесообразно пользоваться компьютерным моделированием [5].

При конструктивной проработке литых деталей целесообразно облегчать их удалением металла из малонагруженных участков, находящихся в стороне от силового потока. Примеры такого облегчения приведены на рис. 3: (а, б) – фланец многоугольной формы взамен круглой; двутавровый рычаг (в) облегчается удалением неработающих средних участков тавра (г). Облегчение удалением лишнего металла на мелких деталях и отдельных участках приводит к значительной экономии массы машин и механизмов.

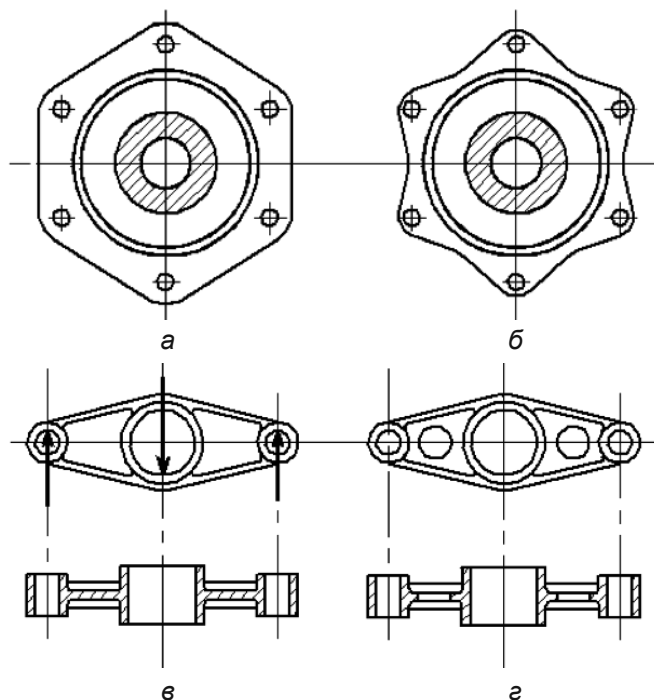


Рис. 3. Примеры облегчения отливок: а – фланец многоугольной формы; б – фланец с выкружками; в – двутавровый рычаг; г – двутавровый рычаг с удалением неработающих средних участков тавра; облегчение болтового пояса фланца (а) достигает 30 %, болтового пояса фланца (б) – 40 %

Большое влияние на качество отливок и экономию металла оказывают литейная система и установка прибылей и выпоров. Организация гидродинамического процесса заполнения формы жидким металлом должна решаться равномерным заполнением при ламинарном движении; улавливанием неметаллических включений; отсутствием инжекции газов в полость литейной формы; определением необходимых размеров и соотношения площадей поперечных сечений литниковых каналов при минимально возможном расходе металла на литники; сохранением необходимой направленности затвердевания отливки с последующим, по возможности, равномерным ее остыванием и свободной усадкой. Изучение гидродинамики формирования потоков металла непосредственно в форме может производиться в сочетании физического и математического моделирования с использованием ЭВМ и учетом оптимальных параметров заливки форм. Эти исследования могут послужить основой разработок новых технологических процессов получения качественного литья, снижения брака и экономии металла.

В процессе затвердевания и кристаллизации питание отливок осуществляется жидким металлом

прибылей, которые, кроме основного их назначения – восполнения объемной усадки, являются выпором и резервуаром, в который могут всплывать экзо- и эндогенные включения [6, 7, 8]. Экономия металла на прибылях оценивается объективным показателем расхода металла на отливку, определяющим степень совершенства технологического процесса производства (ТВГ). Это отношение массы отливки к массе жидкого металла, израсходованного на одну отливку,

и умноженное на 100, то есть $\text{ТВГ} = \frac{M_{\text{отл}}}{M_{\text{ж.м.}}} \cdot 100\%$. Мас-

са жидкого металла принимается без учета потерь на сплески, сливы из ковша, происходящие при прогреве стопорного стакана, остатка в ковше после заливки последней формы и брака отливок. Это может достигаться такими способами:

- применением закрытых прибылей вместо открытых;
- при выборе геометрической формы предпочтительнее шаровые прибыли [9], поскольку шаровидная форма имеет наименьшее отношение поверхно-

сти к объему: $V_{\text{ш}} = \frac{4}{3} \pi R^3 = \frac{1}{6} \pi D^3$; $F_{\text{ш}} = \pi D^2$.

Модель прибыли из пенополистирола выполняет эту задачу с минимальными затратами на оснастку, несмотря на поглощение тепловой энергии расплава при термодеструкции пенополистироловой модели: при заливке формы чугуном при 1300–1350 °С моделью поглощается 14,44 МДж/кг, а сталью при 1550–1600 °С – 20,5 МДж/кг;

– теплоизоляцией стенок формы, окружающих прибыль, с использованием формовочных материалов с низким коэффициентом аккумуляции тепла $b_{\text{ф}}$, например, форма с облицовкой из хромомagneзита или хромистого железняка ($b_{\text{ф}} = 4000 \text{ Вт} \cdot \text{с}^{1/2} / \text{м}^2 \cdot \text{°С}$) заменяется облицовкой из песчано-глинистой смеси ($b_{\text{ф}} = 1700 \text{ Вт} \cdot \text{с}^{1/2} / \text{м}^2 \cdot \text{°С}$). Объем прибыли при этом уменьшается на 20–25 % при той же эффективности питания;

– использованием прибылей, действующих под атмосферным или газовым давлением. В первом случае в закрытую прибыль устанавливается цилиндрический газопроницаемый стержень диаметром 12–15 мм, который своим внутренним концом доходит до предполагаемого центра усадочной полости. Таким образом, при кристаллизации внешней корки прибыли жидкий металл внутри не изолирован от атмосферного давления, которое осуществляется через стержень. Во втором случае в полость прибыли устанавливается трубка с газотворным материалом (как правило, CaCO_3 + уголь или кокс). Выделение газов за счет прогрева смеси теплом жидкого металла должно начинаться только после образования на поверхностях стенок отливки и прибыли корки затвердевшей стали достаточной толщины. Расчет давле-

$$\frac{P_0 V_0}{T_0} = \frac{P_1 V_1}{T_1}, \quad (6)$$

ния газов в прибыли производиться по формуле Клайпейрона – Менделеева:

где V_0 – первоначальный объем СО, полученного при разложении патрона; P_0 – давление данной массы газа; T_0 – первоначальная абсолютная температура газа; V_1 – объем газа при температуре нагрева патрона; P_1 – давление газа при температуре нагрева; T_1 – абсолютная температура газа после нагрева. Использование таких прибылей позволяет увеличить ТВГ на 12–18 %;

– для широкоинтервальных сплавов, например, алюминиево-магниевого, характерна склонность к образованию газоусадочных раковин, что снижает прочностные параметры, эксплуатационную надежность отливок. Эта проблема может быть решена путем комплексного воздействия [10] воздушного давления на жидкий и кристаллизующийся металл в сочетании с направленной кристаллизацией, создаваемой проточными наружными холодильниками при литье в керамизированные формы. Эффективность этого предложения для сплава АЛ21-1: пористость литья по шкале ВИАМ снижается с 5 до 1–2 класса; прочностные и пластические характеристики возрастают: σ_B – на 20 %, δ – на 32 %; расход металла на прибыли сокращается на 18 %;

– для отливок, имеющих большую усадку, применяются закрытые прибыли с различными видами подогрева. Значительная экономия металла обеспечивается при использовании экзотермических смесей для обогрева прибылей стального, цветного и крупного чугуна литья. Технологическое решение этой задачи заключается в установке перегородки (диафрагмы) между отливкой и прибылью. Диафрагма изготавливается из керамики твердофазного спекания и может быть плоской либо фигурной с полостью, в которой размещается экзотермическая смесь [11, 12, 13]. Такое устройство позволяет повысить ТВГ на 15–25 % без ущерба качества питания. Кроме того, такие диафрагмы облегчают отделение прибыли от отливки. Это особенно важно для высоколегированных сталей из-за низкой теплопроводности и большой вероятности образования трещин при огневой резке.

Одной из основных характеристик литейных сплавов являются неметаллические включения (НВ) и газы, в значительной степени определяющие комплекс свойств отливок. В зависимости от характера и природы включений – экзо- или эндогенных, степени чистоты сплавов и их газосодержания, механические свойства отливок существенно изменяются. С уменьшением количества НВ растет КСЧ, σ_B , δ . Механические свойства сплавов заметно снижаются при наличии газовых раковин, пористости, флокенов и других дефектов. Борьба с НВ и газами ведется в следующих направлениях [14]:

– разработка и внедрение нормативно-технической документации, ужесточающей содержание вредных примесей в сплавах;

– подготовка квалифицированных специалистов-литейщиков, проектирующих и поддерживающих технологические процессы на современном уровне;

– освоение прогрессивных методов анализа фазового состава и морфологии включений;

– внедрение мероприятий по очистке сплавов от НВ после рафинирования;

– интенсификация различных способов окислительного периода при плавке;

– внедрение новых форм модифицирования и окончательного раскисления, внепечной обработки расплавов. В борьбе с экзогенными включениями целесообразно использовать керамизированные литейные формы и литье в низкотемпературные формы. Эти мероприятия позволяют повысить прочность и пластичность сплавов, а за счет этого уменьшить массу отливок.

Качество отливок, оцениваемое только свойствами сплавов, недостаточно для определения эффективности, характеризующейся КИМ. Геометрическая точность при этом имеет большое значение: это размерная точность, шероховатость поверхности, пространственные отклонения и точность конфигурации. Если идти по пути повышения геометрической точности только механической обработкой, то на стружку мы теряем 18–20 % массы литья, что и происходит в настоящее время и приводит к большим материальным затратам и потере металла. Кроме того, нужно учитывать, что снятие поверхностных слоев отливки заметно ухудшает ее механические, физические и химические свойства. Наибольшую геометрическую точность обеспечивают специальные способы литья; однако около 85 % всего литья изготавливается в разовые песчаные формы, что не обеспечивает высокую точность отливок. При решении этой задачи не следует добиваться универсальности процесса, обеспечивающего все четыре параметра: для каждого вида литья приоритетным является один из параметров. Например, для корпусного литья это размерная точность, для лопастных колес – качество поверхности, которое оказывает непосредственное влияние на ряд эксплуатационных свойств необработанных отливок, – таких, например, как механические свойства, химическая стойкость, гидравлические потери, теплопроводность. К этим свойствам можно отнести обрабатываемость отливок с учетом припусков на механическую обработку, способность воспринимать лакокрасочные покрытия, эмали и наплавки.

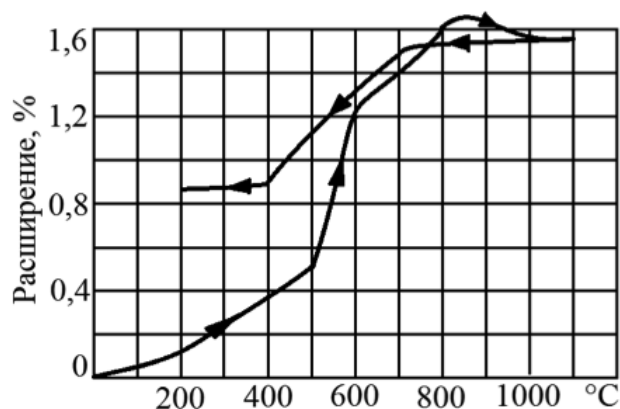
В производственных условиях литейного цеха снизить потери металла можно следующими мероприятиями: контроль массы отливок в сравнении с расчетными из-за больших литейных уклонов, увеличения толщины стенок, большого брака литья; снижение угара и безвозвратных потерь жидкого металла; ограничение механических потерь металла при вывозке отработанной смеси путем магнитной сепарации; уменьшение слива металла в шлаковню; внедрение методов неразрушающего контроля пороков отливок; организация участков по исправлению брака литья; входной контроль за качеством исходных материалов для всех звеньев технологического процесса изготовления отливок (формовочные материалы, шихта, специальные добавки, снижающие отбел и пригар отливок, облегчающие операции по скачиванию шлака в индукционных печах или выбивку отливок из песчано-жидкостекольных смесей, покровно-рафинирующие флюсы и дегазирующие добавки для цветного литья). Также необходимо контролировать теплоизолирующие и экзотермические

смеси, позволяющие повысить ТВГ [15]. Эти и другие мероприятия позволяют экономить от 5 до 15 % металла от годовой завалки.

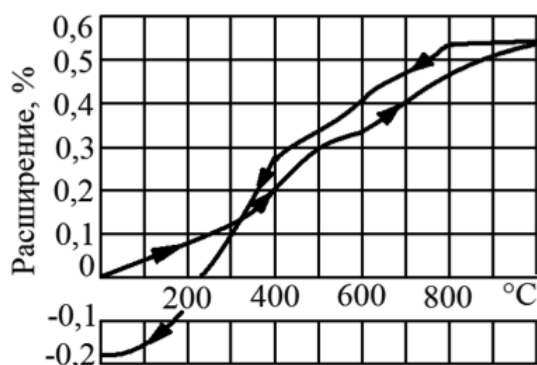
Действенным средством снижения массы литья является повышение прочности термической обработкой. Наиболее распространенным является отжиг для улучшения механических свойств, снятия внутренних напряжений в литье. Как правило, после отжига может следовать нормализация, закалка с отпуском, старение, стабилизация структуры и другие виды термообработки (ТО). Выбор способа и режимов ТО зависят от марки сплава и условий эксплуатации литых деталей.

Значительный экономический и социальный эффект достигается при замене кварцевого песка на оливиновый при изготовлении отливок из различных сплавов и применении различных технологий. Оливин представляет собой изоморфную смесь форстерита $2\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$ и фаялита $2\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$. Для формовочных песков используют оливиновые породы с содержанием фаялита до 10 %, так как огнеупорность оливина с увеличением содержания железа понижается с 1890 до 1750 °С. Эти пески используют для производства отливок из стали, тугоплавких и титановых сплавов. Оливиновые пески более огнеупорны, чем кварцевые, вместе с тем они обладают значительно меньшим коэффициентом температурного расширения (рис. 4), чем кварцевые, благодаря чему этот песок представляет наибольшую ценность для получения отливок с поверхностями малых шероховатостей и без пригара [16]. Санитарно-гигиенические условия труда работающих в литейных цехах значительно улучшаются при использовании оливиновых песков – отсутствие пыли, содержащей SiO_2 , исключает заболевание силикозом, что значительно улучшает экологию и привлекательность литейного производства.

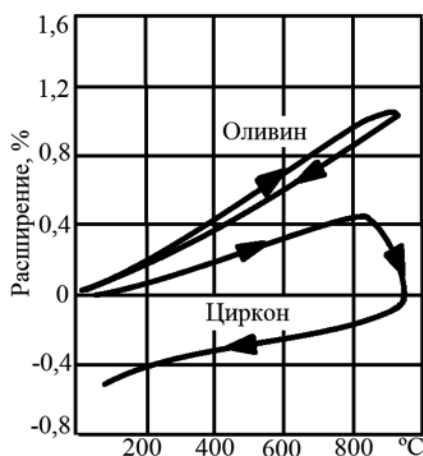
Поверхностный слой отливок играет большую роль в эксплуатационной надежности. Стремление учитывать структуру литейной корочки, наличие или отсутствие дефектов усадочного и газового происхождения, морфологию неметаллических включений, пригар, шероховатость поверхности приводит к большому количеству технологических решений, направленных на решение этой проблемы. Однако традиционная технология литья не решает комплекс проблем, связанных с повышением эксплуатационной надежности отливок и сближением свойств литых и кованных заготовок. Решение проблемы может осуществляться применением композиционного литья, имеющего большие возможности по уменьшению отходов металла, трудовых затрат, материалоемкости машин. Это предопределяется тем, что при композиционном литье синтезируются отдельные элементы, которые могут быть выполнены наиболее эффективными методами формообразования для данного элемента из материалов, отвечающих требованиям, предъявляемым к деталям. Такие элементы, установленные в литейную форму, заливаются матричным металлом и объединяются в единое целое – композиционную отливку, гетерогенность которой позволяет получить сумму служебных свойств



а



б



в

Рис. 4. Дилатометрия формовочных смесей с различными огнеупорными материалами: а – SiO_2 ; б – хромистый железняк; в – оливин и циркон $\text{ZrO}_2 \cdot \text{SiO}_2$

нового качества, недоступного для отдельных элементов, составляющих композицию. Решающими для этой технологии являются контактные процессы, осуществляющие связь между элементами [17]. Технологический процесс изготовления композиционных отливок заключается в пропитке жидким металлом пористых металлокерамических оболочек, формирующих рабочую поверхность отливки. Это обеспечивает низкую шероховатость, управление в широком диапазоне структурой поверхностного слоя и физико-механическими свойствами.

Последнее время в промышленности начинает широко внедряться нанотехнология. Особенностью

материалов в наноразмерном состоянии является наличие на их поверхности большого количества атомов, имеющих нескомпенсированные связи, это обуславливает повышенную свободную энергию нанообъектов и их интенсивное взаимодействие с окружающей средой. Преимущества наноматериалов в технологии литейного производства заключаются в следующем:

- прочность и пластичность сталей с нанокристаллической структурой выше показателей традиционных конструкционных материалов в 2–2,5 раза. Повышение прочностных характеристик достигается наномодифицированием расплава в печи, на желобе, в ковше или форме;

- наноматериал (TiCN , Cr_3C_2 , WC и др.) может вводиться в состав покрытия, наносимого на внутреннюю поверхность литейной формы, что формирует металлокерамический слой отливки на глубину более 10 мм. Износостойкость этого слоя, упрочненного нанодисперсными частицами, в 2,5–3 раза выше износостойкости матричного металла;

- затвердеванию и кристаллизации отливок в низкотемпературных песчаных формах препятствует процесс теплоотвода. Это формирует крупнокристаллическую структуру, снижает физико-механические свойства. Ввод в расплав наноразмерных компонентов приводит к измельчению зерна, повышению дисперсности дендритной структуры, увеличению механических свойств отливок. Эти и другие способы применения наноматериалов (1–100 нм) дают повышение механических и служебных свойств, возможность снижения массы отливок.

Производство отливок по традиционной схеме печь – ковш – литейная форма все чаще сталкивается в конкуренции с аддитивным (additive – послойное формирование объемного объекта) производством на 3D-принтерах, которые выполняют функцию микролитейных цехов. При 3D-печатании металлошхту подают в микроплавильную ванну, которую компьютер, управляя принтером с источником энергии, продвигает вдоль всего тела отливки, послойно его наплавляя; другим вариантом является послойное формирование объемного изделия из порошка металла, которое подвергается спеканию в печи до монолитной конструкции. Системы трехмерного параметрического проектирования используются для 3D-моделирования отливок, оснастки, моделирования процессов заливки, кристаллизации и охлаждения металла в форме. Наиболее доступной является технология 3D-печати экструзией. Несмотря на существующие недостатки (высокая зольность, длительность выжигания моделей, высокий коэффициент термического расширения и др.), эта технология позволяет сократить время от этапа проектирования до выпуска готовой продукции, получить высокую точность печати, минимизировать мехобработку, увеличить КИМ.

Выводы и перспективы использования. Технологический выход годного отливок и коэффициент использования металла литых деталей являются индикативными показателями уровня развития отрасли и служат резервом повышения эффективности ли-

тейного производства. Достигается это за счет разработки новых технологических процессов и совершенствования существующих при перевооружении литейных цехов. Наиболее острыми проблемами в решении этих задач являются следующие:

- снижение массы литых деталей за счет тщательной конструкторско-технологической проработки геометрии детали, выбора сплава с учетом особенностей литейной технологии, использования компьютерного моделирования, организации гидродинамического процесса заполнения формы жидким металлом с учетом формирования потоков непосредственно в форме, интенсификации работы прибылей, повышения свойств сплавов в процессе плавки;

- повышение геометрической точности отливок путем внедрения новых методов формообразования, формовочных материалов;

- организационные мероприятия по снижению потерь металла в литейных цехах;

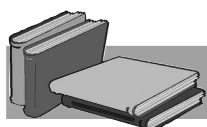
- широкое внедрение термической обработки отливок различными способами для различных сплавов;
- расширение номенклатуры композиционного литья, позволяющего синтезировать отдельные элементы отливки, отвечающие требованиям эксплуатационной надежности;

- повышение профессионального уровня специалистов, работающих непосредственно в цехах, в НИИ, ВУЗах, НАН Украины;

- создание имиджа привлекательности профессии литейщика улучшением условий труда, экологической и санитарно-гигиенической ситуации за счет применения новых материалов и технологий;

- активное внедрение наноматериалов в технологические процессы, позволяющее резко повысить механические и служебные свойства отливок;

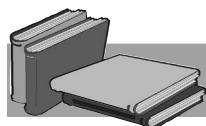
- синтез новых, более эффективных производственных процессов на базе аддитивных технологий с использованием 3D-принтеров.



ЛИТЕРАТУРА

1. Шинский О.И. Снижение металлоемкости литейной продукции – основа развития отрасли // *Оборудование и инструмент для профессионалов*. – 2011. – № 1. – С. 78–79.
2. Орлов П.И. Основы конструирования. – М.: Машиностроение, 1988. – 560 с.
3. Ясюков В.В., Лысенко Т.В., Солоненко Л.И., Чередник В.А. Анализ и синтез физико-химического воздействия на эксплуатационную надежность отливок // *Металл и литье Украины*. – 2016. – № 8-9. – С. 19–23.
4. Ясюков В.В., Лысенко Т.В., Козишкурт Е.А., Солоненко Л.И. Процессы кристаллизации и затвердевания отливок в разовых литейных формах // *Металл и литье Украины*. – 2018. – № 11-12. – С. 54–61.
5. Огородникова О.М., Пигина Е.В., Мартыненко С.В. Компьютерное моделирование горячих трещин в литых деталях // *Литейное производство*. – 2007. – № 2. – С. 27–30.
6. Нехендзи Ю.А. Стальное литье. – М.: Металлургиздат, 1948. – 766 с.
7. Василевский П.Ф. Технология стального литья. – М.: Машиностроение, 1974. – 408 с.
8. Бидуля П.Н. Технология стальных отливок. – М.: Машгиз, 1961. – 352 с.
9. Ващенко К.И., Софрони Л. Магниевый чугун. – М-К.: Машгиз, 1960. – 487 с.
10. Ясюков В.В., Лысенко Т.В., Солоненко Л.И., Пархоменко Е.А. Методы воздействия на процесс формирования отливки // *Металл и литье Украины*. – 2018. – № 3-4. – С. 47–51.
11. А. с. 502709 СССР, МКИ В 22 В 27/06. Диафрагма для отделения прибыли от отливки / Оболенцев Ф.Д., Ясюков В.В. (СССР). 2047057/22-2; заяв. 25.07.74; опубл. 15.02.76, Бюл. 6. – С. 1.
12. Оболенцев Ф.Д., Ясюков В.В. Применение керамических перегородок с обогревом для легкоотделяемых прибылей // В сб. *Технология и организация производства*. – Киев, 1978. – С. 37–39.
13. Воронова О.И., Лысенко Т.В., Ясюков В.В. Легкоотделяемые прибыли для отливок пресс-форм литья под давлением // *Металл и литье Украины*. – 2015. – № 9. – С. 30–33.
14. Ясюков В.В., Лысенко Т.В., Пархоменко Е.А. Газы и неметаллические включения в стальных отливках // *Металл и литье Украины*. – 2017. – № 11-12. – С. 19–24.
15. Каргинов В.П., Иванов В.Г. Применение вспомогательных материалов производства НПП «Союз» для повышения качества металлургической и литейной продукции // *XIII Міжнародна науково-практична конференція «Литво. Металургія 2017»*. – Запоріжжя, 2017. – С. 122–124.
16. Оболенцев Ф.Д. Качество литых поверхностей. – М.-Л.: Машгиз, 1961. – 183 с.
17. Ясюков В.В., Лысенко Т.В., Волянская К.В. Композиционные отливки с регулируемым поверхностным слоем // *Металл и литье Украины*. – 2016. – № 4. – С. 18–23.

Поступила 15.03.2019



REFERENCES

1. Shinskiy, O.I. (2011). Reducing the metal content of foundry products – the basis of the industry development. *Equipment and tools for professionals*, no. 1, pp. 78–79 [in Russian].
2. Orlov, P.I. (1988). Basics of design. Moscow: Mechanical Engineering, 560 p. [in Russian].
3. Yasiukov, V.V., Lysenko, T.V., Solonenko, L.I., Cherednik, V.A. (2016). Analysis and synthesis of physical and chemical effects on the operational reliability of castings. *Metall i lit'e Ukrainy*, no. 8–9, pp. 19–23 [in Russian].
4. Yasiukov, V.V., Lysenko, T.V., Kozishkurt, Ye.A., Solonenko, L.I. (2018). The processes of crystallization and solidification of castings in single-casting molds. *Metall i lit'e Ukrainy*, no. 11–12, pp. 54–61 [in Russian].
5. Ogorodnikova, O.M., Pigina, Ye.V., Martynenko, S.V. (2007). Computer simulation of hot cracks in cast parts. *Foundry production*, no. 2, pp. 27–30 [in Russian].
6. Nekhendzi, Yu.A. (1948). Steel casting. Moscow: Metallurgizdat, 766 p. [in Russian].
7. Vasilevskiy, P.F. (1974). Steel casting technology. Moscow: Mechanical Engineering, 408 p. [in Russian].
8. Bidulya, P.N. (1961). Technology of steel castings. Moscow: Mashgiz, 352 p. [in Russian].
9. Vashchenko, K.I., Sofroni, L. (1960). Magnesium cast iron. M.-K.: Mashgiz, 487 p. [in Russian].
10. Yasiukov, V.V., Lysenko, T.V., Solonenko, L.I., Parkhomenko, Ye.A. (2018). Methods of influence on the process of casting formation. *Metall i lit'e Ukrainy*, no. 3–4, pp. 47–51 [in Russian].
11. Obolentsev, F.D., Yasiukov, V.V. (1976). Diaphragm for separating profit from casting. A. s. 502709 USSR, MKI V 22 V 27/06. (USSR) 2047057/22-2; announced 25.07.74; publ. 15.02.76, Biul. 6, P. 1 [in Russian].
12. Obolentsev, F.D., Yasiukov, V.V. (1978). The use of ceramic partitions with heating for easily dividing profits. *Technology and organization of production*. Kiev, pp. 37–39 [in Russian].
13. Voronova, O.I., Lysenko, T.V., Yasiukov, V.V. (2015). Easily separable profits for casting of injection molds. *Metall i lit'e Ukrainy*, no. 9, pp. 30–33 [in Russian].
14. Yasiukov, V.V., Lysenko, T.V., Parkhomenko, Ye.A. (2017). Gases and nonmetallic inclusions in steel castings. *Metall i lit'e Ukrainy*, no. 11–12, pp. 19–24 [in Russian].
15. Karginov, V.P., Ivanov, V.G. (2017). Use of auxiliary materials produced by Soyuz NPP to improve the quality of metallurgical and foundry products. *XIII Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiia "Lit'e. Metalurgii 2017"*. Zaporizhzhia, pp. 122–124 [in Russian].
16. Obolentsev, F.D. (1961). The quality of cast surfaces. M.-L.: Mashgiz, 183 p. [in Russian].
17. Yasiukov, V.V., Lysenko, T.V., Volianskaia, K.V. (2016). Composite castings with an adjustable surface layer. *Metall i lit'e Ukrainy*, no. 4, pp. 18–23 [in Russian].

Received 15.03.2019

Анотація

В.В. Ясюков, канд. техн. наук, приват-професор, доц. кафедри технології та управління ливарними процесами, e-mail: odessa810@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6453-5712>;
Т.В. Лисенко, д-р техн. наук, проф., зав. кафедри технології та управління ливарними процесами, e-mail: tvl12odessa@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3183-963x>;
О.І. Воронова, приват-доцент, ст. викладач кафедри технології та управління ливарними процесами, e-mail: olgaliptuga@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2976-0794>;
Л.І. Солоненко, канд. техн. наук, ст. викладач кафедри технології та управління ливарними процесами, e-mail: solonenkoli14@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2092-8044>

Одеський національний політехнічний університет, Одеса, Україна

Аналіз способів підвищення ефективності ливарного виробництва

Технологічний вихід придатного виливків (ТВП) і коефіцієнт використання металу литих деталей (КВМ) є індикативними показниками рівня розвитку ливарного виробництва. Зазначені аспекти напряму подальшого розвитку ливарного виробництва розглядаються в сфері створення нових і вдосконалення існуючих технологічних процесів формоутворення, плавки і способів лиття. Найбільш гострими проблемами у вирішенні цих завдань є такі: зниження маси литих деталей за рахунок ретельного конструкторсько-технологічного опрацювання геометрії деталі, вибору

сплаву з урахуванням особливостей ливарної технології, використання комп'ютерного моделювання, організації гідродинамічного процесу заповнення форми рідким металом з урахуванням формування потоків безпосередньо в формі, інтенсифікації роботи надливів, підвищення властивостей сплавів в процесі плавки; підвищення геометричної точності виливків шляхом впровадження нових методів формоутворення, формувальних матеріалів; організаційні заходи щодо зниження втрат металу в ливарних цехах; широке впровадження термічної обробки виливків різними способами для різних сплавів; розширення номенклатури композиційного лиття, що дозволяє синтезувати окремі елементи виливка, які відповідають вимогам експлуатаційної надійності; підвищення професійного рівня фахівців, які працюють безпосередньо в цехах, в НДІ, ВНЗ, НАН України; створення іміджу привабливості професії ливарника поліпшенням умов праці, екологічної та санітарно-гігієнічної ситуації за рахунок застосування нових матеріалів і технологій; активне впровадження наноматеріалів в технологічні процеси, що дозволяє різко підвищити механічні та службові властивості виливків; синтез нових, більш ефективних виробничих процесів на базі адитивних технологій з використанням 3D-принтерів. Розглянуті технологічні процеси вирішують цю двоєдину задачу.

Ключові слова

Технологічний вихід придатного виливків, коефіцієнт використання металу литих деталей, експлуатаційна надійність литої деталі, геометрична точність литої деталі, ливарне виробництво.

Summary

V.V. Yasiukov, Candidate of Engineering Sciences, Private Professor, Associate Professor at the Department of Technology and Management of Foundry Processes, e-mail: odessa810@ukr.net,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6453-5712>;

T.V. Lysenko, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Department of Technology and Management of Foundry Processes, e-mail: tv12odessa@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3183-963x>;

O.I. Voronova, Private Associate Professor, Senior Lecturer of the Department of Technology and Management of Foundry Processes, e-mail: olgaliptuga@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2976-0794>;

L.I. Solonenko, Candidate of Engineering Sciences, Senior Lecturer of the Department of Technology and Management of Foundry Processes, e-mail: solonenkoli14@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2092-8044>

Odessa National Polytechnic University, Odessa, Ukraine

Analysis of ways to improve the efficiency of foundry

Technological yield of castings (TYC) and the utilization rate of the metal of cast parts (URM) are indicative indicators of the level of foundry development. These aspects of the future development of the foundry are considered in the area of creating new and improving existing technological processes of forming, smelting and casting methods. The most acute problems in solving these tasks are as follows: reducing the mass of cast parts due to careful design and technological study of the geometry of the part, selection of the alloy with regard to the casting technology, use of computer simulation, organization of the hydrodynamic process of filling the mold with liquid metal, taking into account the formation of flows directly in the form, the intensification of the work of heads, improving the properties of alloys in the smelting process; improving the geometric accuracy of castings by introducing new methods of forming, molding materials; organizational measures to reduce metal losses in foundries; widespread introduction of heat treatment of castings in various ways for various alloys; expansion of the composite casting nomenclature, which allows to synthesize individual casting elements that meet the requirements of operational reliability; professional development of specialists working directly in the shops, research institutes, universities, the NAS of Ukraine; creating an image of the attractiveness of the caster profession by improving working conditions, the environmental and sanitary situation through the use of new materials and technologies; the active introduction of nanomaterials into technological processes, which makes it possible to sharply increase the mechanical and service properties of castings; synthesis of new, more efficient production processes based on additive technologies using 3D printers. The considered technological processes solve this dual problem.

Keywords

Technological yield of castings, utilization rate of the metal of cast parts, operational reliability of the cast part, geometric accuracy of the cast part, foundry.

Системные подходы к решению проблемы обеспечения качества в литейном производстве

Проблема обеспечения качества в литейном производстве связана с решением локальных технологических задач на всех стадиях металлургического передела в триаде «шихта – расплав – отливка». При этом реализуются кооперативные, многофакторные и многофункциональные явления процессов литья. Таким образом, обозначенная проблема является многоцелевой и многофакторной. В этом случае наиболее рациональным и эффективным является системный подход к управлению качеством. При этом необходимо достоверно отобразить не только элементы системы, но и показать каналы передачи информации, влияя на которые и можно обеспечить управление.

Цель работы – сопоставить различные принципы системного моделирования при решении проблемы управления качеством отливок в литейном производстве. В работе предложено их классифицировать как системы, изложенные или на языке событий, или на языке работ. Показано, что первый вариант предполагает использование метода абстракций, в котором многообразие ключевых факторов, определяющих качество, можно объединять интегральными понятиями, которые рассматриваются как самостоятельные объекты для анализа. Таким образом, систему триады «шихта – расплав – отливка», которая содержит некий детерминизм, показывающий причинную обусловленность трех материальных объектов, предусматривающих выполнение некоторых работ для достижения цели, в работе предложено заменить абстрактными понятиями системы иной триады – «обрабатываемость – эффективность – успешность». В этом случае система абстракций определяет намерения, которые должны быть нацелены на конечный результат – событие. Иначе – система на языке работ закладывает необходимость выполнения функций, а система на языке событий ориентирует на достижение конечной цели – требуемое качество продукции. При этом можно оперировать разными понятиями, категориями и закономерностями, в которых отображены наиболее адекватно внутренние связи системы – суть каналы передачи информации. Таким образом, реализуются различные возможности управления качеством с помощью векторов цели. Для отдельного производства они имеют свои особенности. В работе подчеркивается, что понятие абстрактной триады «успешность» содержит баланс соотношений «цена – качество», дополняемое понятием «конкурентоспособность». Это должно ориентировать производителей еще и на правовые и экономические условия производства. В то время как система «шихта – расплав – отливка» ограничивается в конечном итоге складом готовой продукции.

Ключевые слова: литейное производство, расплав, управление качеством, системное моделирование, классификация систем, системы на языке работ, системы на языке событий.

Характеристика проблемной ситуации. При использовании любых технологических методов обработки материалов в промышленности всегда конечный результат оценивают показателями качества. Но, к сожалению, публикации, анализирующие проблему качества с учетом всех стадий производства, не часто встречаются в специализированных журналах. Хотя практически каждая статья (или патент) показывает позитивный эффект предлагаемой новации.

Качество продукции можно констатировать *post factum* (пассивный контроль), а можно планировать и контролировать на всех стадиях технологического процесса (активный контроль). Только во втором случае можно обеспечить оперативное управление качеством конечной продукции. Для литейного производства в классической, упоминаемой в различных публикациях триаде системы «шихта – расплав – отливка», используются различные технологические операции и реализуются взаимообусловленные, многофакторные и многофункциональные явления процессов литья. То есть для изготовления высококачественных изделий, получаемых методами литья, их производители сталкиваются с решением слож-

ной проблемы управления качеством, балансируя между понятиями «цена – качество», которые в условиях рынка нужно дополнять понятием «конкурентоспособность». Решение такой проблемы возможно только в рамках системного подхода, основанного на принципах системного моделирования [1–4].

Прагматизм системного подхода к управлению качеством с помощью рациональной организации производства литой металлопродукции заключается, прежде всего, в возможности выработки стандартных решений. Но для этого нужно описать алгоритм управления, выделив множество целей, множество функций, работ и команд, а затем показать возможность получения приближения для соответствующей функции управления. При этом основная задача системного моделирования заключается не в том, чтобы достоверно и полно отобразить элементы многофакторной системы, а в том, чтобы отобразить их взаимосвязь и описать каналы передачи информации. Если в элементах системы отображаются образы, в которых проецируются концептуальные понимания факторов, влияющих на подцели, то каналы передачи информации определяют так называемую «интенсивность» системы [4]. В свою очередь

решения, направленные на управление системой и ее регулирование, реализуются через влияние (воздействие) на процессы в каналах передачи информации.

К сожалению, на сегодня в полной мере выполнить эти условия для системы «шихта – расплав – отливка», определяемой так в общем виде, невозможно.

В работе [1] проанализированы некоторые модельные подходы управления качеством в литейном производстве, содержащие элементы системного анализа. Но они охватывают лишь небольшой класс различных подцелей, хотя и не лишены в некоторых случаях определенной степени общности. Также в работе [1] проанализированы проблемы, возникающие при управлении качеством литой продукции. Показано, что общие базовые принципы управления качеством на фундаментальном уровне сформулированы. Но применительно к литейным процессам многозвеньевые системы управления качеством еще разрабатываются.

Цель данной работы – сопоставить различные принципы системного моделирования при решении проблемы управления качеством отливок в литейном производстве.

Системный подход к выбору энергетических методов обработки расплава. В триаде «шихта – расплав – отливка» ключевая роль принадлежит среднему звену. Именно на этой стадии передела нужно нивелировать отрицательные наследственные признаки шихты и обеспечить оптимальные условия для кристаллизационной способности расплава с последующим формированием структуры уже отливки. С этой целью активно развивались различные методы обработки расплава, начиная от печного агрегата и заканчивая, после полного образования

твердой фазы в форме, последующей термообработкой отливки, при необходимости. Эти методы можно разделить на реагентные и энергетические. В первом случае, в расплав вводят малые дозы различных химических элементов, действие которых избирательно: измельчить зерненную структуру отливки, модифицировать эвтектику, дегазировать расплав и т. п. Для другой группы методов характерна энергетическая природа воздействия на расплав, так как здесь обработка проводится с помощью различных физических полей (электромагнитного, акустического, теплового, силового). Такое действие на объект обработки, в отличие от реагентного, является многофункциональным и многоцелевым, что существенно усложняет оптимизацию характеристик нагружения. Общим элементом методов энергетической обработки (МЭО) является источник тока (или напряжения), в той или иной мере адаптированный до условий генерирования заданного физического поля как сферы воздействия на расплав.

В работе [5] ранее был изложен подход, в соответствии с которым структурирована и в общих чертах проанализирована система признаков, которые нужно учитывать при выборе метода энергетической обработки расплава (рисунок).

Такая система может характеризоваться как подсистема в интегральной триаде системы «шихта – расплав – отливка», а может рассматриваться как самостоятельная на стадии проектирования.

Основное ее назначение – показать многофакторность проблем, связанных с проектированием и эксплуатацией МЭО. В тоже время, представленные на рисунке шесть признаков необходимо учитывать при описании и структурировании методов, средств обеспечения и мониторинга для управления качеством



Обобщенная система признаков при выборе метода энергетической обработки расплава

литого металла, начиная от стадии принятия проектных решений и до стадии формирования условий продаж. То есть, используя, в том числе систему на рисунке, можно обосновано предполагать управленческие решения.

Сделаем следующие пояснения.

Признак 1 определяет выбор физического принципа МЭО. Здесь нужно учитывать, что каждый из них является многофункциональным и многоцелевым. При этом и функциональные возможности генерируемого в расплаве первичного поля и возникающие при этом процессы практически всегда являются конкурирующими. Наиболее активно это может проявляться при обработке расплава повторяющимися импульсами энергии [6]. Например, при пропускании через объект обработки импульсов тока за счет его скинирования проявляется эффект электро-магнитно-акустического преобразования энергии [7]. Кроме того, при любом из физических принципов воздействия, обозначенных на рисунке, формируются течения расплава различной интенсивности. Еще одной важной особенностью МЭО является то, что воздействие на расплав осуществляется неким элементом технологического модуля (волновод, электроды, магниты и т. п.), который размещен или вне или внутри емкости с расплавом. Такое воздействие осуществляется локально. Таким образом, как показано в той же работе [6], в том числе и по этой причине в макрообъеме расплава генерируемые поля не являются однородными. В этом случае нужно выделять область наиболее активного воздействия в объеме расплава и сопоставлять ее со всем объемом расплава. Тогда можно оценить требуемое минимальное время обработки с учетом поля течений.

На стадии выбора физического принципа МЭО при производстве литых изделий необходимо отдавать предпочтение тому из них, для которого наиболее полно изучены как особенности воздействия, так и его функциональные возможности.

Признак 2 определяет качественно новое понимание структуры расплава по шести уровням, которые на порядки отличаются линейными размерами и характерными временами процессов. В работе [8] предложено выделить пять таких уровней: от макро – до атомарного. Важность электронного уровня для металлической системы подчеркнута, например, в работах [9, 10]. Таким образом, структура расплава может быть наиболее полно описана в виде шести-уровневой системы при взаимосогласованных процессах взаимодействия между уровнями, реализуемых в каналах или шлюзах передачи информации (воздействия). Существенными признаками такой системы является иерархия уровней [8, 11, 12] и определенный порядок величины энергии, обеспечивающей устойчивость структуры материала [13].

Признак 3 дополняет признаки 1 и 2 в рамках триады «принцип воздействия – структура – свойства», определяющей научные направления материаловедения. Такая триада позволяет выявить закономерности между внешними структуро-формирующими параметрами воздействия (ВСФПВ) и внутренними структурно-кинетическими и фазовыми изменениями (ВСКФИ) в обрабатываемом металле, которые, с од-

ной стороны, учитывают его свойства, а с другой – изменяют их.

Далее представлено более полное описание признаков 2 и 3 (рисунок).

Признак 4 подчеркивает функциональные возможности МЭО расплава в разных температурных интервалах его агрегатного состояния, что определяется целью обработки, может быть даже без привязки к энергозатратам.

Признак 5 является обязательным элементом системы признаков МЭО как на стадии исследований, так и в условиях производства. Именно уровень сервиса современных наукоемких технологий, в том числе при изготовлении литой металлопродукции, должен обеспечить сбор данных о ходе операций металлургического передела, их анализ, формирование управляющих команд. Без этого в принципе нельзя обеспечить требуемое качество.

Признак 6 учитывает не только затраты при производстве в процессе использования МЭО, но и затраты на приобретение технологического модуля. При этом выделены такие важные составляющие всего технологического комплекса, как «стабильность» его работы, и «стабильность» получения продукции заданного качества, «надежность» оборудования и его «эффективность» в понимании полноты реализации целенаправленного воздействия на расплав. Важная роль при использовании наукоемких технологий отводится персоналу, который должен обладать определенным набором общих и специальных знаний, уметь планировать и эксплуатировать оборудование, вести надзор, определять приоритеты и выявлять несоответствия. И если относительно Признака 5 можно сказать, что он должен показать и обеспечить уровень «Smart Technology», то персонал должен иметь уровень своей подготовки, характеризующийся как «Smart Service Staff».

Системы структуры и свойств жидкого состояния. В работе [14] для однокомпонентных жидких металлов понятие иерархии элементов в системе структуры рассматривается как последовательное вертикальное расположение их уровней (см. рисунок). Передача информации происходит от низшего уровня (макроструктуры) к высшему (базовому), который принимает решение и передает управляющие команды в обратном направлении [11, 12]. Эта концепция позволила предположить, что формирование величины характеристик физических свойств материала, за счет соответствующей компоновки структуры, происходит только благодаря ключевым управляющим решениям на верхнем уровне системы структуры. При этом, численное значение характеристики, которое измеряют на макроуровне, практически совпадает по значению с тем, что может быть вычислено на базовом уровне с помощью правил размерности. Для этого нужно определить масштабы этого базового уровня, на котором происходят элементарные акты процессов: длина (L), масса (M), время (T), температура (Θ), сила электрического тока (I), количество вещества (N). В работе [14] определены величины этих масштабов на базовом уровне при условии записи размерности свойств в основных еди-

ницах СИ. Причем, такие свойства, как проводимость и теплопроводность формируются процессами на электронном (субатомарном) и атомарном уровнях. Кооперативно: вязкость, поверхностное натяжение, плотность, теплоемкость, скорость звука, энергетические характеристики материала – на атомарном. Сделаем простую оценку, которая показывает работоспособность такой гипотезы. Размерность динамической вязкости η [Па·с] в основных единицах SI имеет вид [кг/(м·с)]. Тогда соответствующие масштабы базового атомарного уровня (массу, длину, время) можно принять соответственно равными массе атома (Ma), радиусу первой координационной сферы (r_1) и некоторому характерному времени $T \approx 10^{-13}$ с. Оценим величину η с учетом ее размерности для следующих жидких металлов: η (Mg) $\approx 1,26 \cdot 10^{-3}$ Па·с; η (Al) $\approx 1,62 \cdot 10^{-3}$ Па·с; η (Zn) $\approx 3,69 \cdot 10^{-3}$ Па·с. Эти результаты хорошо совпадают с табличными данными, измеренными на макроуровне [15], и, соответственно, равными: $1,25 \cdot 10^{-3}$; $1,3 \cdot 10^{-3}$; $3,85 \cdot 10^{-3}$ Па·с.

В работе [14] проведены расчеты 9 характеристик свойств для 15 металлов, перегретых на ≈ 50 °C над точкой плавления. Сопоставление этих данных с результатами измерений [15] показало продуктивность выдвинутой гипотезы.

Таким образом, представлен фундаментальный принцип взаимосвязи системы «структура – свойства», в соответствии с которым свойства жидких металлических материалов, измеряемые на низшем уровне структуры (макро), формируются с помощью высших (базовых) уровней системы структуры с иерархией. Тогда, для изменения свойств низшего уровня структуры необходимо, чтобы МЭО расплава функционально был способен непосредственно влиять на перестройку базового уровня.

Коль скоро характеристики свойств металлических расплавов определяются процессами на базовых уровнях структуры, которые являются взаимообусловленными, то естественно предположить и взаимообусловленность свойств жидких металлов. В работе [16] на основе анализа размерностей и теории подобия построены безразмерные комплексы структурно-чувствительных свойств жидких металлов, которые имеют вид:

$$K_1 = \frac{C \cdot v \cdot \rho}{\sigma \cdot z_1}; \quad K_2 = \frac{\lambda \cdot e^2}{\gamma \cdot k^2 \cdot T \cdot \sqrt{z_1}}; \quad K_3 = \frac{\lambda \cdot T}{v \cdot \rho \cdot C^2 \cdot \sqrt{z_1}}.$$

По крайней мере, для 14 анализируемых в работе [16] металлов $K_1 = K_2 = K_3 \approx 1$. В безразмерных комплексах представлены: C – скорость звука; v – кинематическая вязкость; ρ – плотность; σ – поверхностное натяжение; λ – теплопроводность; γ – электропроводность, температура (T). Заряд электрона (e) и постоянная Больцмана (k) учтены при анализе размерностей как дополнительные параметры безразмерных комплексов. Первое координационное число Z_1 в первой степени или под радикалом обеспечило равенство $K_1 = K_2 = K_3 \approx 1$. Наличие Z_1 в безразмерных комплексах показывает, что минимальным единичным элементом для модельных представлений

процессов в расплаве может выступать первая координационная сфера. Позднее, в работе [17], это было логично обосновано, что подтвердило правомочность использования значения Z_1 в указанных комплексах K_1 ; K_2 ; K_3 .

Физический смысл безразмерных комплексов можно представить следующим образом. В комплексе K_1 сопротивление среды изменению ее состояния ($\rho \cdot C$) с учетом диссипации энергии (v) соотносится с мерой некомпенсированности межчастичных сил в межфазном слое (σ). В комплексе K_2 , который представляет собой формулу Видемана-Франца, записанную с точностью до $\sqrt{Z_1}$, соотносятся характеристики процессов переноса. В комплексе K_3 характеристика передачи теплоты ($\lambda \cdot T$) соотносится с плотностью внутренней энергии ($\rho \cdot C^2$) и характеристикой диссипации энергии (v).

Таким образом, указанные безразмерные комплексы можно представить как фундаментальные константы, показывающие взаимосвязь структурно-чувствительных свойств жидкого металла и подтверждающие их взаимообусловленность, формируемую кооперативными процессами на базовых уровнях системы структуры с иерархией.

Система факторов МЭО расплава, определяющих баланс элементов в системе «шихта – расплав – отливка» в виде абстрактных интегральных понятий. Представленные выше локальные системы, а также проанализированные в работе [1], можно рассматривать как подсистемы интегральной триады «шихта – расплав – отливка» (или в иных терминах «цена – качество – конкурентоспособность», но с другими акцентами). Поэтому они не могут в полной мере ее структурировать и описать, а тем более адекватно определить соответствующие алгоритмы управления.

Причина в том (еще раз подчеркнем), что технологические операции металлургического передела в литейном производстве, а также процессы, реализуемые МЭО, являются многофункциональными и многоцелевыми. Кроме того, в работе [18] выделено порядка 10^3 факторов, которые в той или иной мере оказывают влияние на конечные показатели качества отливки. Здесь понятие «фактор» не всегда можно определить в численном значении. Его целесообразно рассмотреть как причину, определяющую функциональную способность элементов системы [12]. Вместе с тем, логично в общем виде построить систему факторов, определяющих показатели качества отливок, в следующей последовательности: «факторы, определяющие качество шихты – факторы, определяющие кристаллизационную способность расплава – факторы, определяющие процессы формирования структуры при его охлаждении – факторы, определяющие показатели качества отливок».

Далее воспользуемся методом абстрагирования, определяемым как выделение неких интегральных понятий, учитывающих совокупность ключевых факторов. Их набор позволяет оценить результат, заложенный в цель абстрагирования. Такие интегральные понятия обозначаются определенными именами, что придает им статус самостоятельных

объектов для анализа. Например, такие хорошо известные абстрактные понятия, как «надежность» или «технологичность». Используя метод абстрагирования, можно отобразить указанную систему факторов, определяющих показатели качества, следующей последовательностью абстрактных образов (понятий):

«Обрабатываемость (Treatment Ability) → Эффективность (Efficiency) → Успешность (Success Fullness)».

Этим понятиям дадим следующие определения и пояснения.

Обрабатываемость – функциональная способность объекта обработки позитивно воспринимать и реагировать на внешние структуро-формирующие параметры воздействия. Это понятие в рамках последовательности ранее обозначенной системы факторов интегрально охватывает первые два.

Эффективность – мера полноты реализации целенаправленного действия, проявляющегося набором внутренних структурно-кинетических и фазовых изменений. В принципе, это понятие сродни понятию коэффициента полезного действия, так как оно показывает степень влияния внешних структуро-формирующих параметров воздействия на результат внутренних структурно-кинетических и фазовых изменений.

Успешность – степень достигаемой цели обработки. Очевидно, что полное определение этой степени может быть учтено соотношением всех затрат («цена») и достигаемой цели обработки («качество»), дополненной успешностью продаж («конкурентоспособность»).

Развитие системы абстракций может быть подкреплено дальнейшими исследованиями процессов при МЭО и систематизацией экспериментальных данных с целью более полного представления образов абстракций в их интегральных понятиях.

Обсуждение представленных результатов.

Методы системного анализа могут использовать различные модельные представления, отличающиеся структурированием системы, ее описанием и заложенными в систему понятиями как результат обобщения массы единичных явлений. Так, элементы системы можно отобразить на языке событий, а можно на языке работ. В первом случае (целевом) – к такому-то времени, в таком-то месте должно наступить требуемое событие. При этом для достижения цели могут использоваться различные подходы. Во втором (функциональном) – должна быть выполнена некая работа, которая априори закладывается в систему. В этих двух случаях разнятся принципы и методы управления, реализуемые каналами передачи информации, что отразится на эффективности и успешности достигаемой цели системного моделирования.

Предлагаемые в данной статье системы, которые можно рассматривать как подсистемы глобальной системы управления качеством отливки, также отличаются заложенными в них понятиями и целями (подцелями).

В классической глобальной системе триады «шихта – расплав – отливка» как, впрочем, и в тех, которые упомянуты и проанализированы в работе [1], содержится некий детерминизм, показывающий при-

чинную обусловленность трех материальных объектов. Они в кажущейся линейной последовательности определяют материализацию намерений до уровня работ, заранее заложенных в систему для обеспечения высоких показателей качества отливок.

Система «цена – качество – конкурентоспособность» скорее ориентируется на намерения (события), чем на конкретику работ. Здесь уже есть признаки неких абстракций.

Система признаков для выбора метода энергетической обработки расплава (см. рисунок) ориентирует проектировщиков на комплексное рассмотрение проблемы обеспечения качества учетом всех шести признаков. Здесь также заложен некий детерминизм с причинной обусловленностью намерений до уровня работ. Системы структуры и свойств расплава, представленные в развитие второго и третьего признаков обобщенной системы (рисунок), представляют собой материаловедческие аспекты энергетической обработки. Система структуры выделяет иерархию уровней структуры. Система свойств обобщает с точностью до взаимосвязи физические свойства расплава, что поясняется взаимообусловленностью элементарных процессов на высшем уровне системы структуры, когда шесть базовых масштабов взаимообусловлено формируют величины характеристик свойств. Прагматизм двуединой системы «структура – свойства» в рамках изложенного в данной статье заключается в том, что для активного позитивного изменения кристаллизационной способности расплава метод его обработки должен напрямую влиять на процессы высшего (базового) уровня структуры. При этом свойства не будут меняться обособленно.

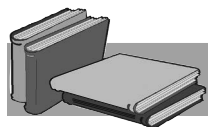
Все эти системы объединяет то, что они нацелены на выполнение определенных работ. В противовес этому логично предложена система на языке событий (намерений) «обрабатываемость – эффективность – успешность», которая представлена на языке абстракций.

Для сложной системы управления качеством такой подход является наиболее перспективным. В словах «шихта», «расплав», «структура» и т. п. сообразно их общим свойствам охвачено множество различных восприятий материальных объектов, подлежащих анализу, то есть определенным образом эти слова можно воспринимать как некие абстракции. Система абстракций, изложенная словами-намерениями, а не словами-объектами, ориентирует ее на выполнение различными возможностями не только для достижения цели, но и возможностями поиска персоналом нетривиальных решений в управлении качеством. С помощью абстрактной системы познание сложных явлений литейного производства переходит от единичных (дискретных) до обобщенных явлений и процессов. При этом создаются новые понятия, категории и закономерности, в которых отображены наиболее адекватно внутренние существенные связи – суть каналы передачи информации. Таким образом, формируются различные возможности управления с помощью векторов достижения цели.

Конечное понятие абстрактной триады («успешность») содержит в себе не только уровень требуе-

мого качества, но и конкурентоспособность литых изделий. Это ориентирует их производителей на наполняемость такой триады не только техническими и технологическими условиями производства, но и экономическими и правовыми, что более соответствует

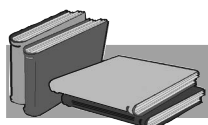
принципам маркетинга – умению заставить рынок купить ваш товар. В то время как система «шихта – расплав – отливка» ограничивается (по своей сути) в конечном итоге складом готовой продукции.



ЛИТЕРАТУРА

1. Цуркин В.Н. Концепции управления качеством литого металла // *Металл и литье Украины*. – 2008. – № 9. – С. 25–28.
2. Друкер П.Ф. Задачи менеджмента в XXI веке / П.Ф. Друкер; пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2004. – 272 с.
3. Котлер Ф. Основы маркетинга / Ф. Котлер; пер. с англ. – М.: Прогресс, 1990. – 736 с.
4. Згуровский М.З., Панкратова Н.Д. Системный анализ. Проблемы, методология, приложения. – К.: Наукова думка, 2005. – 743 с.
5. Цуркин В.Н. Принципы системного подхода к выбору методов внепечной обработки расплава // *Металл и литье Украины*. – 2009. – № 7-8. – С. 12–16.
6. Tsurkin V.N., Ivanov A.V., Cherepovskii S.S., Vasyanovich N.A. Comparative analysis of functional possibilities of methods of pulse treatment of a melt // *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. – 2016. – № 2. – P. 181–185.
7. Зарембо В.И. Влияние импульсов тока на процессы плавления и кристаллизации металлов // *Металлургия машиностроения*. – 2003. – № 1. – С. 11–15.
8. Гуляев Б.Б., Пряхин В.И., Колокольцев В.М. Иерархия структур и механические свойства литой стали // *Литейное производство*. – 1986. – № 10. – С. 9–12.
9. Скороход В.В., Гнесин Г.Г., Ажажа В.М. и др. Иерархия структурных уровней и структурная инженерия неорганических материалов // *Неорганическое материаловедение: Энциклоп. Изд. В 2 т. / Под ред. В.В. Скорохода, Г.Г. Гнесина*. – К.: Наукова думка. – 2008. – Т. 1: Основы науки о материалах. – С. 339–357.
10. Кульбовский, И.К. Зависимость структуры и свойств литых сплавов от электронного строения атомов, входящих в них // *Литейное производство*. – 2008. – № 6. – С. 3–28.
11. Саймон Г. Науки об искусственном. – М.: Мир, 1972. – 216 с.
12. Месарович М., Мако Д., Такахара Я. Теория иерархических многоуровневых систем / пер. с англ. под общ. ред. И.Ф. Шахнова. – М.: Мир, 1973. – 380 с.
13. Вайскопф, В. Физика в двадцатом столетии. – М.: Атомиздат, 1977. – 272 с.
14. Цуркин В.Н. Влияние системы структуры металлического расплава на его физические свойства // *Вісник Українського матеріалознавчого товариства*. – 2011. – № 4. – С. 11–19.
15. Смитлз, Дж.К. Металлы. – М.: Металлургия, 1980. – 447 с.
16. Цуркин В.Н., Дмитришина Я.Ю. Корреляционные характеристики структурно-чувствительных свойств жидких металлов // *Литье и металлургия*. – 2016. – № 1 (82). – С. 40–45.
17. Цуркин В.Н., Иванов А.В., Честных Н.В. Аспекты кристаллизации расплава при его охлаждении // *Процессы литья*. – 2018. – № 1. – С. 30–41.
18. Пономаренко О.И. Оптимизация технологических решений для цехов литейного производства. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2007. – 320 с.

Поступила 01.04.2019



REFERENCES

1. Tsurkin, V.N. (2008). Cast metal quality management concepts. *Metall i lit'e Ukrainy*, no. 9, pp. 25–28 [in Russian].
2. Druker, P.F. (2004). Management challenges for the 21st century. Izdatel'skii dom "Vil'iams", 272 p. [in Russian].
3. Kotler, F. (1990). Marketing basics. Moscow: Progress, 736 p. [in Russian].
4. Zgurovskij, M.Z., Pankratova, N.D. (2005). System analysis: problems, methodology, applications. Kiev: Naukova dumka, 743 p. [in Russian].
5. Tsurkin, V.N. (2009). The principles of a systematic approach to the choice of furnace melt treatment method. *Metall i lit'e Ukrainy*, no. 7–8, pp. 12–16 [in Russian].
6. Tsurkin, V.N., Ivanov, A.V., Cherepovskii, S.S., Vasyanovich, N.A. (2016). Comparative analysis of functional possibilities of methods of pulse treatment of a melt. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, no. 2, pp. 181–185 [in English].
7. Zarembo, V.I. (2003). Effect of current pulses on melting processes and crystallization of metals. *Metallurgiya mashinostroeniia. Metallurgy of Machinery Building*, no. 1, pp. 11–15 [in Russian].
8. Gulyaev, B.B., Pryahin, V.I., Kolokol'tsev, V.M. (1986). Hierarchy of structures and mechanical properties of cast steel. *Liteinoe proizvodstvo. Foundry*. no. 10, pp. 9–12 [in Russian].

9. Skorokhod, V.V., Gnesin, G.G., Azhazha, V.M. et al. (2008). Hierarchy of structural levels and structural engineering of inorganic materials. *Neorganicheskoe materialovedenie. Vol. 1: Osnovy nauki o materialakh*. Kiev: Naukova dumka, pp. 339–357 [in Russian].
10. Kul'bovskij, I.K. (2008). Dependence of the structure and properties of cast alloys on the electronic structure of the atoms within them. *Liteinoe proizvodstvo. Foundry*. no. 6, pp. 3–28 [in Russian].
11. Saimon, G. (1972). The sciences of the artificial. Moscow: Mir, 216 p. [in Russian].
12. Mesarovich, M., Mako, D., Takahara, Ya. (1973). Theory of hierarchical multilevel systems. I.F. Shakhnov (Ed.). Moscow: Mir, 380 p. [in Russian].
13. Vaiskopf, V. (1977). Physics in the twentieth century. Moscow: Atomizdat, 272 p. [in Russian].
14. Tsurkin, V.N. (2011). Influence of the structure of metal casting on its physical properties. *Visnyk Ukrain's'kogo materialoznavchogo tovarystva. Bulletin of the Ukrainian Material Science Society*, no. 4, pp. 11–19 [in Russian].
15. Smitz, Dzh.K. (1980). Metals. Moscow: Metallurgiya, 447 p. [in Russian].
16. Tsurkin, V.N., Dmitrishina, Ya. Yu. (2016). Correlations characteristics of the structure-sensitive properties of liquid metals. *Lit'e i metallurgiya. Foundry production and metallurgy*, no. 1 (82), pp. 40–45 [in Russian].
17. Tsurkin, V.N., Ivanov, A.V., Chestnykh, N.V. (2018). Aspects of crystallization of melt at its cooling. *Protsessy lit'ia. Casting processes*, no. 1, pp. 30–41 [in Russian].
18. Ponomarenko, O.I. (2007). Optimization of technological solutions for foundry workshops. Kharkov: Bulletin of NTU "KhPI", 320 p. [in Russian].

Received 01.04.2019

Анотація

В.М. Цуркін, канд. физ.-мат. наук, доц., пров. наук. співр.,
e-mail: dpta@iipr.com.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2697-579X>

*Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України, Миколаїв,
Україна*

Системні підходи до вирішення проблеми забезпечення якості у ливарному виробництві

Проблема забезпечення якості у ливарному виробництві пов'язана з вирішенням локальних технологічних задач на всіх стадіях металургійного переділу в тріаді «шихта – розплав – виливок». При цьому реалізуються кооперативні, багатофакторні та багатофункціональні явища процесів лиття. Тобто, проблема, яка вище визначена, є багатоцільовою та багатофакторною. У цьому випадку найбільш раціональним і ефективним виступає системний підхід до керування якістю. Тут необхідно достовірно відобразити не тільки елементи системи, але й показати канали передачі інформації, вплив на які й забезпечує керування якістю.

Мета роботи – зіставити різні принципи системного моделювання при вирішенні проблеми керування якістю виливок у ливарному виробництві. У роботі запропоновано їх класифікувати як системи, що їх представлено мовою подій, або мовою робіт. Показано, що перший варіант передбачає застосування методу абстракцій, у якому різноманітність ключових факторів, які визначають якість, можна об'єднувати інтегральними поняттями, що розглядаються як самостійні об'єкти для аналізу. Таким чином, систему тріади «шихта – розплав – виливок», у якій міститься певний детермінізм, що показує причинну обумовленість трьох матеріальних об'єктів, які у свою чергу передбачають виконання деяких робіт для досягнення цілі, у роботі запропоновано замінити абстрактними поняттями системи іншої тріади – «оброблюваність – ефективність – успішність». У цьому випадку система абстракцій визначає наміри, які потрібно націлювати на кінцевий результат – подію. Інакше – система мовою робіт має підґрунтям необхідність виконання функцій, а система мовою подій орієнтує на досягнення кінцевої цілі – якість продукції, яка є потрібною. При цьому можна оперувати різними поняттями, категоріями та закономірностями, у яких відображено найбільш адекватно внутрішні зв'язки системи – суть канали передачі інформації. Таким чином, реалізуються різні можливості керування якістю за допомогою векторів цілі. Для окремого виробництва вони мають свої особливості. У роботі підкреслено, що поняття абстрактної тріади «успішність» містить баланс співвідношення «ціна – якість», що його доповнено поняттям «конкурентоздатність». Це мусить орієнтувати виробників ще й на правові та економічні умови виробництва. В той час як система «шихта – розплав – виливок» обмежується у кінцевому підсумку складом готових виробів.

Ключові слова

Ливарне виробництво, розплав, керування якістю, системне моделювання, класифікація систем, системи мовою робіт, системи мовою подій.

Systems approaches to solving the problem of quality assurance in foundry

The problem of quality assurance in foundry is associated with the solution of local technological problems at all stages of the metallurgical cycle in the triad “charge – melt – casting”. At the same time, cooperative, multifactorial and multifunctional phenomena of casting processes are realized. So, the indicated problem is multi-purpose and multifactorial. In this case, the most rational and effective is a systematic approach to quality management. At the same time, it is necessary to reliably display not only the elements of the system, but also to show the channels of information transfer, an influence on which can be achieving management.

The purpose of the work is to compare the various principles of system modeling in solving the problem of casting quality management in foundry. In this paper, it was proposed to classify them as systems set forth either in the language of events or in the language of works. It is shown, that the first option involves the use of the method of abstractions, in which the variety of key factors determining quality can be combined with integral concepts that are considered as independent objects for analysis. Thus, the “charge – melt – casting” triad system, which contains some determinism, showing causation of three material objects, providing for performing some work to achieve the goal, is supposed to be replaced by abstract concepts of a different triad system – “treatment ability – efficiency – success fullness”. In this case, the abstractions system determines the intentions that should be aimed at the result – an event. Otherwise – the system in the language of work lays down the need to perform functions, and the system in the language of events focuses on the achievement of the ultimate goal – the required product quality. At the same time, it is possible to operate with different concepts, categories and laws, in which the internal communications of the system are most adequately displayed – these are the channels of information transfer. So, various quality management capabilities using target vectors are implemented. For separate production, they have their own characteristics. The paper emphasizes that the concept of the abstract triad “success fullness” contains a balance of ratios “price – quality”, supplemented by the concept “competitive ability”. This should guide manufacturers also on the legal and economic conditions of production. While the system of “charge – melt – casting” is limited ultimately to the finished goods warehouse.

Keywords

Foundry, melt, quality management, system modeling, classification of systems, systems in the language of work, systems in the language of events.

Я.Д. Василев, д-р техн. наук, профессор

Р.А. Замогильный, мл. науч. сотр., e-mail: rz90@i.ua

В.А. Гринкевич, д-р техн. наук, профессор

Национальная металлургическая академия Украины (НМетАУ), Днепр, Украина

Влияние технологических параметров процесса холодной полосовой прокатки на производительность двухклетевых реверсивных станов

Исследовано влияние технологических параметров при производстве холоднокатаного проката основного сортамента на среднечасовую производительность на двухклетевых реверсивных станах. Установлено, что при прокатке жести и тонких полос толщиной 0,16–1,0 мм, условной шириной 1000 мм, со скоростью 10–30 м/с из рулонов подката массой 15–35 т, среднечасовая производительность этих станов изменяется в диапазоне от 30 до 215 т.

Показано, что при прокатке жести и полос малой толщины из рулонов постоянной массы основное влияние на уровень среднечасовой производительности оказывает скорость прокатки, причем с уменьшением толщины полосы это влияние возрастает. Увеличение массы рулонов, особенно при прокатке жести и полос малой толщины, не относится к числу факторов, оказывающих решающее влияние на среднечасовую производительность. Поскольку наиболее интенсивный рост среднечасовой производительности двухклетевых реверсивных станов при производстве проката их основного сортамента наблюдается в диапазоне изменения скорости прокатки 20–25 м/с, максимальная проектная скорость в 22,5 м/с этих станов является обоснованной и целесообразной. При производстве жести и тонких полос масса рулонов на уровне 25–28 т обеспечивает приемлемо высокий уровень среднечасовой производительности при ведении процесса на скорости до 20–25 м/с и может рассматриваться как необходимая и достаточная. Увеличение массы рулонов до 30–36 т представляется целесообразным при проектировании двухклетевых реверсивных станов для выпуска продукции разнообразного сортамента объемом до 0,9–1 млн т в год.

Приведенная в статье методика расчета среднечасовой производительности на двухклетевых реверсивных станах и полученные с ее помощью материалы могут быть использованы при обосновании сортамента и определении параметров технологии и основного оборудования двухклетевых реверсивных станов холодной прокатки 1400 и 1750, сооружение которых актуально для Украины.

Ключевые слова: холодная прокатка, двухклетевый реверсивный стан, технология, производительность, параметр, скорость, масса.

Введение. Основным технико-экономическим показателем работы любого стана холодной полосовой прокатки является часовая производительность, величина которой определяется технологическими параметрами процесса (сортаментом, массой рулонов, скоростью прокатки) и возможностями установленного механического и электрического оборудования. Вопросы определения производительности непрерывных и одноклетевых реверсивных станов холодной полосовой прокатки рассмотрены подробно в литературе [1, 2]. Важным практическим результатом этих работ явились рекомендации по определению целесообразных значений массы рулонов и скорости холодной прокатки на многоклетевых (непрерывных) и одноклетевых реверсивных станах.

Двухклетевые реверсивные станы – это новый тип станов холодной полосовой прокатки, которые были созданы примерно четверть века тому назад [3]. Они представляют собой некий разумный компромисс между многоклетевыми (непрерывными) и одноклетевыми (реверсивными) станами, что позволило в значительной мере реализовать преимущества и минимизировать недостатки этих станов. Отличительной особенностью двухклетевых реверсивных станов

является высокая гибкость в работе, меньшие капитальные затраты на их сооружение, высокая скорость прокатки (до 20–22,5 м/с) и относительно низкая себестоимость выпускаемой продукции, несмотря на несколько завышенные отходы металла, что делает экономически выгодной их эксплуатацию для производства жести (0,10–0,20 мм) холоднокатаных полос толщиной 0,3–1,0 мм и менее из низкоуглеродистых и высокопрочных сталей объемом от 200–400 до 500–850 тыс. т в год и более. По этой причине двухклетевые реверсивные станы получили широкое распространение. В настоящее время в высокоразвитых и развивающихся странах мира успешно эксплуатируется более 30 двухклетевых реверсивных станов холодной прокатки. Имеются обоснованные предложения о целесообразности строительства таких станов и в Украине [4, 5]. Это весьма своевременно и актуально для отечественного металлургического комплекса, принимая во внимание, что последний стан холодной прокатки в стране был построен в 1963 году, то есть более 50 лет тому назад.

Сегодня, судя по материалам немецкой фирмы SMS Demag [6], разработчика и одного из крупнейших производителей двухклетевых реверсивных

станов холодной прокатки в мире, известных под названием Compact Cold Mills (CCM), можно констатировать, что основные технические характеристики этих станов для выпуска продукции указанного выше сортамента определены удачно и могут рассматриваться как обоснованные. В частности, в качестве рабочих клетей для производства жести и тонких полос из высокопрочных сталей, рекомендуется использовать шестивалковые клетки типа CVC -6, а для производства полос толщиной 0,3–1,0 мм из низкоуглеродистых сталей – клетки типа CVC -4 с уменьшенным диаметром рабочих валков, соответственно до 200 и 400 мм и длиной бочки 1200–1750 мм. Вместе с тем многие вопросы технологии, вытекающие из особенностей многопропускной реверсивной холодной прокатки в двух клетях при производстве продукции разного сортамента, требуют дополнительного изучения и оптимального решения. К числу таких вопросов относятся: распределение частных относительных обжатий по клетям и пропускам, обоснование и расчет оптимальных режимов обжатий и натяжений, определение часовой производительности стана, массы рулонов горячекатаного подката, целесообразной скорости прокатки и др.

Цель работы. Целью настоящей работы является исследование влияния технологических параметров холодной полосовой прокатки на среднечасовую производительность двухклетевых реверсивных станов для обоснования целесообразной скорости прокатки и массы рулонов исходного подката на этих станах.

Постановка задачи и методика исследования. Двухклетевые реверсивные станы холодной полосовой прокатки являются по существу непрерывными станами, которые работают в реверсивном режиме. В работе [1] приведены решения для определения среднечасовой производительности на одноклетевых реверсивных станах холодной прокатки и на традиционных многоклетевых (непрерывных) станах, где реверс не применяется. При этом было установлено, что зависимости $A = \varphi(V_{уст})$ (где A – среднечасовая производительность стана, т/час; $V_{уст}$ – установившаяся скорость прокатки, м/с) при постоянной массе рулона подката в условиях прокатки на одноклетевых реверсивных и на непрерывных станах холодной прокатки имеют одинаковый характер изменения, описываемый кривыми вида параболы. Было также выявлено, что максимум производительности в реальном диапазоне скоростей прокатки, применяемых на действующих станах, не достигается. Полученные в работе [1] уравнения $A = \varphi(V_{уст})$ были использованы для определения целесообразной массы рулонов подката и скорости прокатки на упомянутых станах. В частности, было установлено, что экономически целесообразная скорость при холодной прокатке тонких полос и жести на одноклетевом реверсивном стане с длиной бочки рабочих валков 1200 мм находится в диапазоне 18–23 м/с, а приемлемая масса рулонов подката, независимо от годовой производительности стана, составляет 20 т [1].

Используя общепринятые подходы при определении среднечасовой производительности A на поло-

совых одноклетевых реверсивных станах холодной прокатки [1], авторами статьи ранее была получена следующая формула для определения данного параметра на двухклетевых реверсивных станах, учитывающая особенности технологии реверсивной прокатки в двух последовательно расположенных клетях [7]:

$$A = \frac{3600m_p}{c_1m_p \sum_{i=1}^n \frac{1}{V_{устi} h_i} + c_2(1+k) \sum_{i=1}^n V_{устi}} + \frac{3600m_p}{(c_3 + c_4k) \sum_{i=1}^n \frac{1}{V_{устi}} + c_5 + n(c_6k + c_7) + c_8}, \text{ т/ч;} \quad (1)$$

где

$$c_1 = \frac{1}{\rho_n b}, \text{ м}^2/\text{т};$$

$$c_2 = 0,5 \left(\frac{1}{a_p} + \frac{1}{a_t} \right), \text{ с}^2/\text{м};$$

$$c_3 = 0,5 \left(\frac{1}{a_p} + \frac{1}{a_t} \right) V_3^2 - l_3, \text{ м};$$

$$c_4 = 0,5 \left(\frac{1}{a_p} - \frac{1}{a_t} \right) V_{шуст}^2 - l_{шуст}, \text{ м};$$

$$c_5 = \tau_{3,0} - \left(\frac{1}{a_p} + \frac{1}{a_t} \right) V_3, \text{ с};$$

$$c_6 = \frac{l_{шуст}}{V_{шуст}} - \left(\frac{1}{a_p} + \frac{1}{a_t} \right) V_{шуст};$$

$$c_7 = \tau_{рев}, \text{ с};$$

$$c_8 = \frac{3600\tau_{нв}}{Q_{нм}}, \text{ ч/т},$$

где m_p – масса рулона, т; $V_{устi}$ – установившаяся скорость прокатки в данном пропуске, м/с; i, n – соответственно порядковый номер пропуска и число пропусков; k – число сварных швов в укрупненном рулоне ($k = m_p/m_{гкп} - 1$, где $m_{гкп}$ – масса одинарного рулона горячекатаного подката, т); h_i – толщина полосы в i -ом пропуске, мм; ρ_n – плотность материала полосы, т/м³; b – ширина прокатываемой полосы, м; a_p, a_t – ускорение при разгоне и торможении главного привода стана, м/с²; l_3 – длина концов рулона прокатанных на заправочной скорости V_3 – в начале и в конце цикла, и не прокатываемых во время i -того пропуска, м; $l_{шуст}$ – длина полосы, прокатанная на постоянной пониженной скорости $V_{шуст}$ при прохождении сварного шва, м; V_3 – заправочная скорость прокатки, м/с; $\tau_{3,0}$ – время неперекрываемых вспомогательных и заправочных операций, включая прокатку переднего и заднего конца рулона на заправочной скорости (обычно $\tau_{3,0} = 30\text{--}60$ с), с; $\tau_{рев}$ – время необходимое для реверса при осуществлении следующего пропуска, с; $\tau_{нв}$ – норма времени на перевалку рабочих валков двух клетей, ч; $Q_{нм}$ – плановая норма металла, прокатываемого между двумя перевалками, т.

Анализ формулы (1) показал, что характер изменения зависимости $A = \varphi(V_{уст})$ на двухклетевых реверсивных станах не отличается от характера изменения аналогичных зависимостей на непрерывных и одноклетевых реверсивных станах.

Количественные данные о влиянии технологических параметров на производительность двухклетевых реверсивных станов получали расчетным путем. С этой целью по формуле (1) определяли среднечасовую производительность на двухклетевом реверсивном стане при холодной прокатке жести и тонких полосы из стали 08кп с условной шириной 1000 мм, толщиной 0,16; 0,2; 0,3; 0,5; 0,8; 1,0 мм. Толщина подката составляла соответственно: 1,6; 1,8; 2,0; 2,3; 2,7; 3,0 мм.

Расчет режимов деформации производили по методике, приведенной в работе [8]. Остальные исходные данные принимали такими же, как и в работе [1]. В ходе выполнения расчетов варьировали значениями скорости прокатки от 10 до 30 м/с с шагом 5 м/с и массой одинарных рулонов подката ($k = 0$) от 15 до 35 т с шагом 10 т, что позволило охватить весь возможный диапазон изменения скорости прокатки и массы рулонов горячекатаного подката на действующих двухклетевых реверсивных станах. Результаты расчетов представлены в таблице.

Анализ полученных данных. Из таблицы видно, что в зависимости от толщины прокатываемых полос, шириной 1000 мм, скорости прокатки и массы рулонов подката, расчетные значения среднечасовой производительности двухклетевых реверсивных станов изменяются в пределах от 30,4 до 215,8 т или более чем в 7 раз. Видно также, что абсолютные значения среднечасовой производительности увеличиваются с ростом скорости прокатки и массы рулонов, причем это увеличение происходит не всегда прямо пропорционально с ростом скорости прокатки и массы рулонов. При прокатке полос малой толщины увеличение скорости прокатки оказывает доминирующее влияние на среднечасовую производительность, поскольку в этом случае относительная продолжительность прокатки каждого рулона при $m_p = const$ на установившейся скорости увеличивается, а относительная продолжительность прокатки на пониженной скорости уменьшается. С увеличением толщины прокатываемых полос при постоянной массе рулонов наблюдается обратная картина. Сплошная ломаная линия на таблице свидетельствует о том, что в условиях прокатки выше и левее этой линии целесообразно вести процесс на более высокой скорости, в том числе при использовании рулонов меньшей массы, поскольку в этом случае достигается эквивалентная или более высокая производительность. В условиях прокатки полос большей толщины, то есть в области ниже и правее сплошной ломаной линии, превалирующее влияние на среднечасовую производительность стана оказывает масса рулонов подката и для достижения высокой производительности процесс прокатки можно вести на более низкой скорости, используя рулоны подката большей массы (в данном случае до 35 т), что логично.

Для дальнейшего анализа данных, приведенных в таблице, воспользовались относительным изме-

Результаты расчетов среднечасовой производительности на двухклетевых реверсивных станах при прокатке жести и тонких полос, шириной 1000 мм

Толщина прокатываемой полосы h , мм	Установившаяся скорость прокатки $V_{уст}$, м/с	Среднечасовая производительность стана A , т/ч при использовании рулонов массой m_p :		
		$m_p = 15$ т	$m_p = 25$ т	$m_p = 35$ т
0,16x1000	10	30,4	34,0	36,8
	15	42,8	48,3	52,3
	20	53,6	60,4	67,4
	25	64,0	72,5	80,6
	30	70,4	79,4	91,5
0,2x1000	10	34,2	37,3	39,7
	15	46,8	52,3	55,9
	20	58,3	65,8	71,1
	25	66,6	76,5	82,0
	30	74,0	86,1	94,3
0,3x1000	10	42,9	46,3	48,3
	15	57,3	63,3	66,6
	20	68,6	77,0	82,5
	25	77,1	87,9	96,7
	30	83,3	95,8	104,6
0,5x1000	10	61,2	66,4	69,0
	15	78,5	88,0	92,8
	20	90,9	104,5	111,8
	25	99,9	116,0	124,9
	30	103,3	124,1	135,2
0,8x1000	10	86,2	96,9	102,4
	15	107,0	125,2	135,1
	20	120,7	145,8	160,0
	25	128,8	157,1	175,2
	30	131,8	165,7	188,7
1,0x1000	10	99,2	113,6	121,1
	15	121,1	144,9	158,2
	20	134,9	166,8	185,6
	25	140,9	178,9	202,3
	30	145,8	188,1	215,8

нением среднечасовой производительности A/A_{15} , представляющим собой отношение среднечасовой производительности A при $m_p = Var$ и $V_{уст} = Var$ для разных толщин прокатываемых полос к среднечасовой производительности A_{15} при прокатке той же толщины полосы на той же скорости из рулонов массой 15 т. Зависимости параметра A/A_{15} от установившейся скорости прокатки и массы рулонов подката в виде гистограмм показаны соответственно на рис. 1 и 2.

Данные рис. 1 свидетельствуют о том, что с увеличением скорости прокатки значения параметра A/A_{15} увеличиваются и при $V = 20-25$ м/с в зависимости от сортамента прокатываемых полос, достигают 1,67–2,19, причем наибольшие значения A/A_{15} зафиксированы при прокатке жести толщиной 0,16 мм (рис. 1, а). Следует также отметить, что при прокатке жести толщиной 0,16–0,20 мм (рис. 1, а, б) и тонких полос толщиной 0,3–0,5 мм (рис. 1 в, г), относительное увеличение среднечасовой производи-

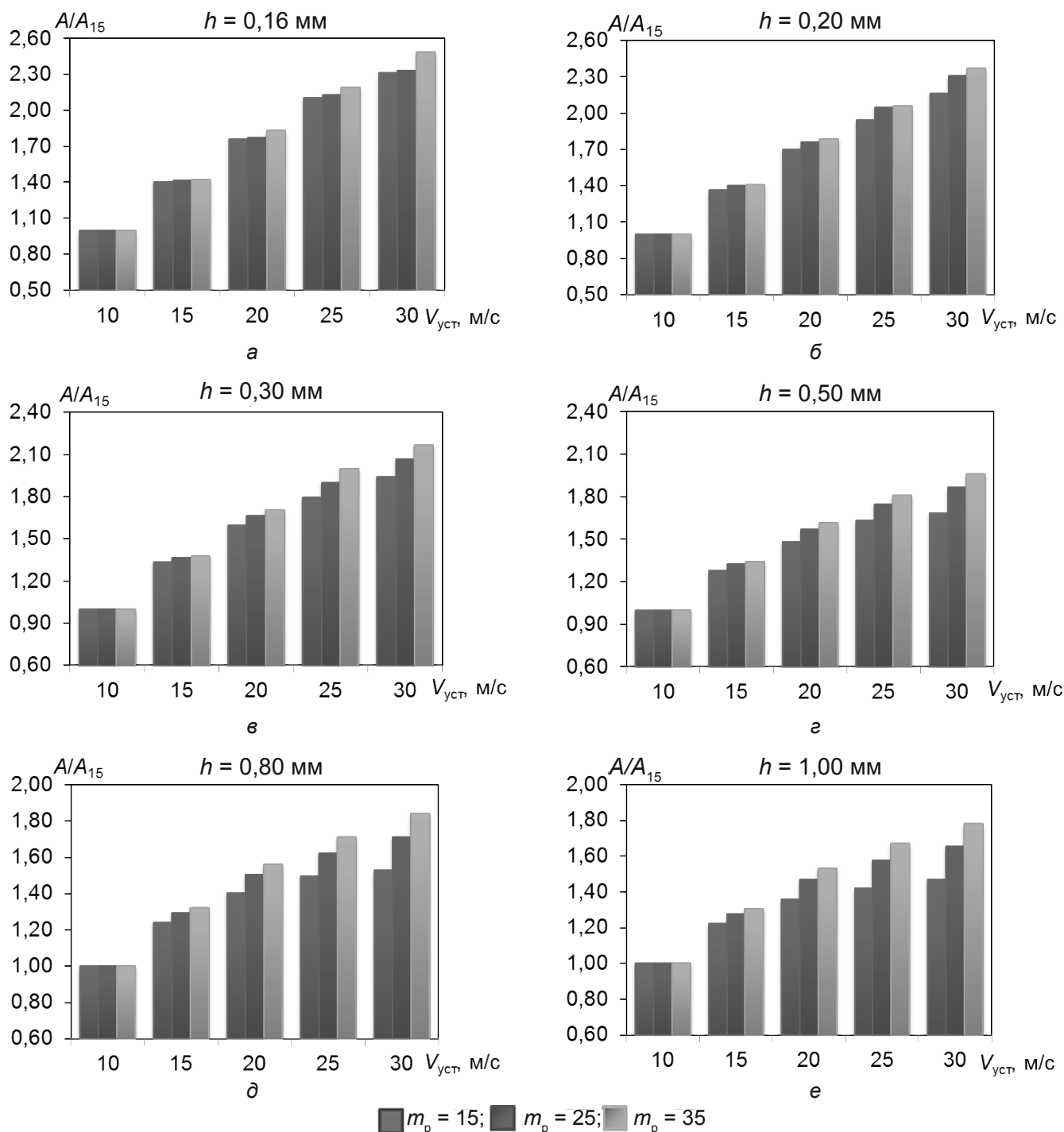


Рис. 1. Зависимости $A/A_{15} = \varphi(V_{уст})$ при производстве проката основного сортамента на двухклетевых реверсивных станах из рулонов подката разной массы

тельности от массы рулонов при $V_{уст} = const$ зависит незначительно. Это влияние наблюдается только при прокатке полос толщиной 0,8 и 1,0 мм (рис. 1, д, е), хотя в этом случае оно обычно не превышает 10–15 %. Поэтому можно считать, что основное влияние на относительное увеличение часовой производительности двухклетевых реверсивных станков, особенно при прокатке жести толщиной 0,16–0,20 мм, оказывает скорость прокатки.

Подтверждением сказанному служат гистограммы, представленные на рис. 2, устанавливающие взаимосвязь между параметром A/A_{15} , массой рулонов, скоростью прокатки и толщиной прокатываемых полос. Из рис. 2 видно, что при увеличении массы ру-

лонов с 15 до 25 т или в 1,67 раза значения параметра A/A_{15} при прокатке полос толщиной 0,16–0,50 мм (рис. 2, а-г) со скоростью до 25 м/с увеличиваются с 1,0 до 1,10–1,15, то есть незначительно, и от скорости прокатки зависят слабо. Более существенный рост параметра A/A_{15} наблюдается при увеличении массы рулонов до 35 т и толщины прокатываемых полос до 0,8–1,0 мм (рис. 2, д-е). В этих условиях прокатки значения параметра A/A_{15} в зависимости от скорости прокатки увеличиваются до 1,20–1,40.

Таким образом, анализ данных, приведенных в таблице и на рис. 1, 2, показал, что наиболее интенсивный рост среднечасовой производительности двухклетевых реверсивных станков наблюдается

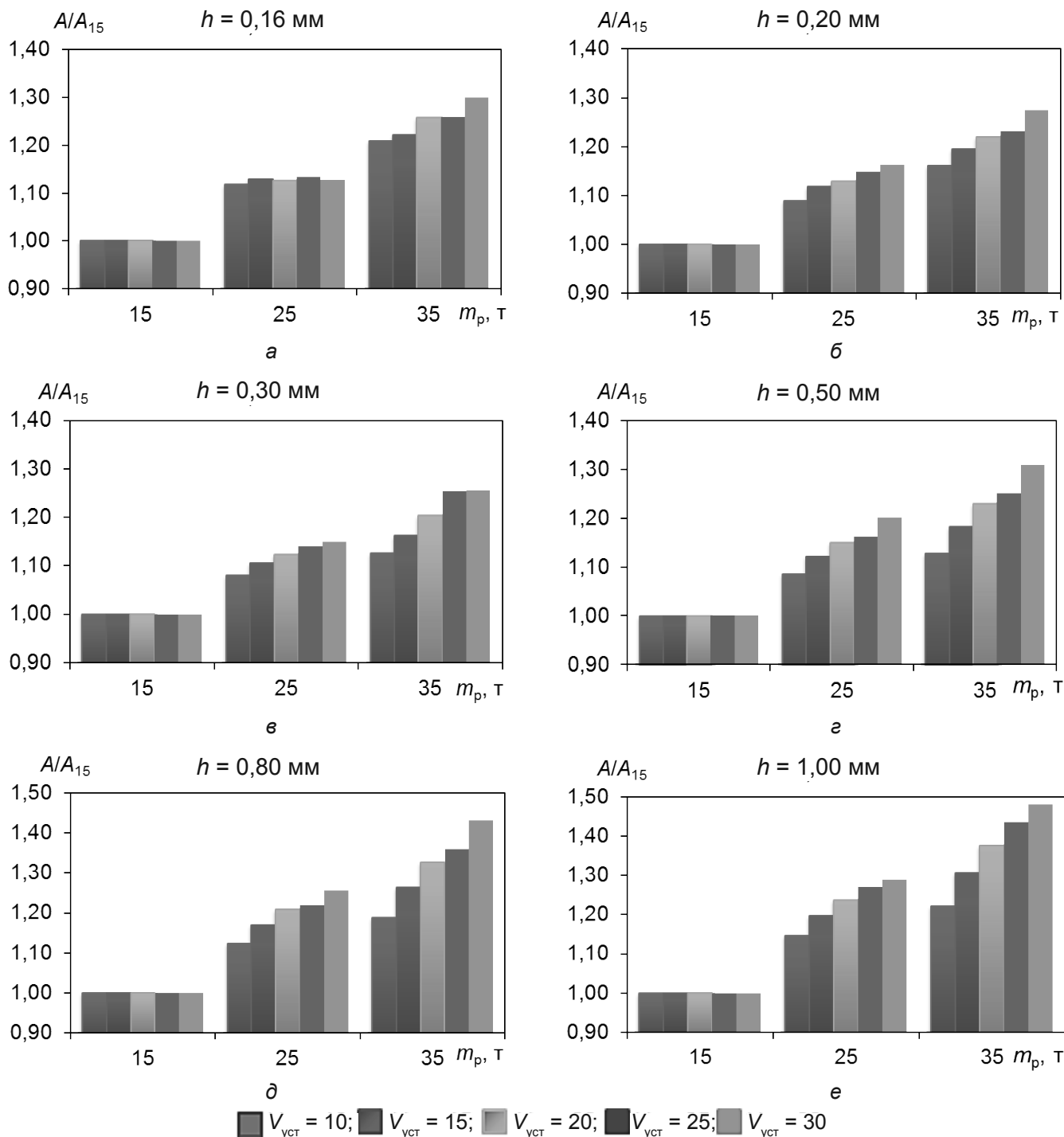


Рис. 2. Зависимости $A/A_{15} = \varphi(m_p)$ при производстве проката основного сортамента на двухклетевых реверсивных станах на разной скорости прокатки

в диапазоне изменения скорости прокатки от 20 до 25 м/с. Поэтому максимальная проектная скорость прокатки этих станов 22,5 м/с может рассматриваться как обоснованная.

Результаты выполненного исследования подтвердили, что среднечасовая производительность двухклетевых реверсивных станов определяется совместным влиянием скорости прокатки и массы рулонов подката. Приведенные в таблице и на рисунках данные свидетельствуют о том, что основное влияние на среднечасовую производительность оказывает скорость прокатки. Увеличение массы рулонов с 15 до 35 т или в 2,33 раза при прокатке полос толщиной 0,16–0,50 мм в диапазоне изменения скорости про-

катки с 10 до 20 м/с приводит к увеличению среднечасовой производительности не более чем на 15–20 %, что не очень существенно. При увеличении толщины прокатываемых полос до 0,8–1,0 мм это влияние возрастает, но, учитывая, что скорость прокатки полос данного сортамента не превышает 10–12 м/с, возможное относительное увеличение среднечасовой производительности при увеличении массы рулонов с 15 до 35 т остается практически на том же уровне. Это означает, что целесообразность увеличения производительности двухклетевых реверсивных станов путем увеличения массы рулонов с 15 до 35 т не является очевидной и остро необходимой. В этом смысле увеличение массы рулонов с 15 до 25–28 т

представляется более обоснованным и вполне приемлемым. Здесь уместно отметить, что увеличение массы рулонов способствует уменьшению отходов металла и может быть оправданным только при необходимости существенного увеличения годовой производительности двухклетевых реверсивных станов. Однако это будет сопровождаться увеличением капитальных затрат на приобретение главных электродвигателей рабочих клетей, а также двигателей моталок и разматывателя большей мощности. С увеличением массы рулонов увеличатся и капитальные затраты на механическое оборудование, установленное в головной и хвостовой части станов, из-за необходимости увеличения его прочностных характеристик. Таким образом, при использовании двухклетевых реверсивных станов для производства жести и тонких полос, масса рулонов горячекатаного подката на уровне до 25–28 т представляется достаточно обоснованной и целесообразной. Использование рулонов большей массы (до 30–36 т) может быть оправданным при необходимости увеличения годового объема производства до 0,9–1,0 млн т проката разнообразного сортамента.

Выводы

Исследовано влияние технологических параметров при производстве холоднокатаного проката основного сортамента на среднечасовую производительность на двухклетевых реверсивных станах. Установлено, что при прокатке жести и тонких полос толщиной 0,16–1,0 мм, условной шириной 1000 мм, со скоростью 10–30 м/с из рулонов подката массой 15–35 т, среднечасовая производительность этих станов изменяется в диапазоне от 30 до 215 т.

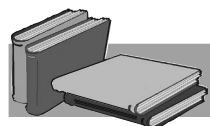
Подтверждено, что среднечасовая производительность на двухклетевых реверсивных станах, как

и на остальных полосовых станах холодной прокатки, формируется в результате совместного влияния толщины полосы, скорости прокатки и массы рулонов подката. При прокатке жести и полос малой толщины из рулонов постоянной массы основное влияние на уровень среднечасовой производительности оказывает скорость прокатки, причем с уменьшением толщины полосы это влияние возрастает. Увеличение массы рулонов, особенно при прокатке жести и полос малой толщины, не относится к числу факторов, оказывающих решающее влияние на среднечасовую производительность.

Результаты выполненного исследования показали, что наиболее интенсивный рост среднечасовой производительности двухклетевых реверсивных станов при производстве проката их основного сортамента наблюдается в диапазоне изменения скорости прокатки 20–25 м/с. Поэтому максимальная проектная скорость в 22,5 м/с этих станов является обоснованной и целесообразной.

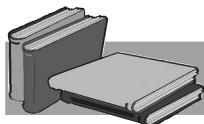
При производстве жести и тонких полос масса рулонов на уровне 25–28 т обеспечивает приемлемо высокий уровень среднечасовой производительности при ведении процесса на скорости до 20–25 м/с и может рассматриваться как необходимая и достаточная. Увеличение массы рулонов до 30–36 т представляется целесообразным при проектировании двухклетевых реверсивных станов для выпуска продукции разнообразного сортамента объемом до 0,9–1,0 млн т в год.

Представленные в статье материалы могут быть использованы при обосновании сортамента и определении параметров оборудования и технологии двухклетевых реверсивных станов холодной прокатки 1400 и 1750, сооружение которых актуально для Украины.



ЛИТЕРАТУРА

1. Химич Г.Л., Третьяков А.В., Гарбер Э.А., Макарова М.А. Оптимальная производительность станов холодной прокатки. – М.: Металлургия, 1970. – 270 с.
2. Белосевич В.К., Нетесов Н.П. Совершенствование процесса холодной прокатки. – М.: Металлургия, 1971. – 272 с.
3. Хекуэт Р. Новый двухклетевой реверсивный стан холодной прокатки на металлургическом заводе фирмы «Heartland Steel» // *Черные металлы*. – 2000. – сентябрь. – С. 84–88.
4. Василев Я.Д., Путники А.Ю., Симененко О.В. Современный стан холодной прокатки для комбината «Запорожсталь» // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2007. – № 1. – С. 37–40.
5. Василев Я.Д., Замогильный Р.А. О создании собственного комплекса для производства жести и тонких холоднокатаных полос высокого качества в Украине // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2018. – № 2 – С. 42–47.
6. Reversing Cold Mills by SMS group – flexible plant concepts tailored to the demands of emerging markets [Электронный ресурс] / Torsten Seeger, Flat Rolling Plants Division // 2nd Cold Rolling & Processing Technology Day, 22.11.2016, Chittagong. – URL: http://steelgroup.co.in/wp-content/uploads/2016/12/S1P2_SMS-Reversing_Cold_Mill_V5.3.pdf
7. Василев Я.Д. Определение производительности двухклетевых реверсивных станов холодной прокатки // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2012. – № 5. – С. 40–43.
8. Василев Я.Д., Самокиш Д.Н., Дементиенко А.В., Завгородний М.И. Единая методика расчета энергосиловых и температурно-скоростных параметров процесса холодной полосовой прокатки // *Бюллетень «Черная металлургия»*. – 2014. – № 1. – С. 50–58.



REFERENCES

1. Khimich, G.L., Tret'iakov, A.V., Garber, E.A., Makarova, M.A. (1970). Optimum productivity of cold rolling mills. Moscow: Metallurgiya, 270 p. [in Russian].
2. Belosevich, V.K., Netesov, N.P. (1971). Improving the cold rolling process. Moscow: Metallurgiya, 272 p. [in Russian].
3. Khekuev, R. (2000). A new two-stand reversing cold rolling mill at the metallurgical plant of the HeartlandSteel company. *Chernye metally. Black metals*, September, pp. 84–88 [in Russian].
4. Vasilev, Ya.D., Putnoki, A.Yu., Simenenko, O.V. (2007). Modern cold rolling mill for the plant Zaporizhstal. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'. Metallurgical and mining industry*, no. 1. pp. 37–40 [in Russian].
5. Vasilev, Ya.D., Zamogil'nyy, R.A. (2018). On the creation of its own complex for the production of tinplate and thin cold rolled strips of high quality in Ukraine. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'. Metallurgical and mining industry*, no. 2. pp. 42–47 [in Russian].
6. Reversing Cold Mills by SMS group – flexible plant concepts tailored to the demands of emerging markets. URL: http://steelgroup.co.in/wp-content/uploads/2016/12/S1P2_SMS-Reversing_Cold_Mill_V5.3.pdf [in English].
7. Vasilev, Ya.D. (2012). Determination of the productivity of double-stand reversing cold rolling mills. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'. Metallurgical and mining industry*, no. 5. pp. 40–43 [in Russian].
8. Vasilev, Ya.D., Samokish, D.N., Dementienko, A.V., Zavgorodnij, M.I. (2014). Unified method of calculating energy and temperature-speed parameters of the process of cold strip rolling. *Chernaya metallurgiya: Biulleten' Instituta "Chermetinformatsiya". Ferrous metallurgy: Bulletin of the Institute "Chermetinformatsiya"*, no. 1, pp. 50–58 [in Russian].

Received 04.01.2019

Анотація

Я.Д. Василев, д-р техн. наук, професор; **Р.О. Замогильний**, мол. наук. співр., e-mail: rz90@i.ua; **В.О. Гринкевич**, д-р техн. наук, професор

Національна металургійна академія України (НМетАУ), Дніпро, Україна

Вплив технологічних параметрів процесу холодної штабової прокатки на продуктивність двохкільцевих реверсивних станів

Досліджено вплив технологічних параметрів при виробництві холоднокатаного прокату основного сортаменту на середньогодинну продуктивність на двохкільцевих реверсивних станах. Встановлено, що при прокатці жерсті і тонких штаб товщиною 0,16–1,0 мм, умовною шириною 1000 мм, зі швидкістю 10–30 м/с з рулонів підкату масою 15–35 т, середньогодинна продуктивність цих станів змінюється в діапазоні від 30 до 215 т.

Показано, що при прокатці жерсті і штаб малої товщини з рулонів постійної маси основний вплив на рівень середньогодинної продуктивності надає швидкість прокатки, причому зі зменшенням товщини штаби цей вплив зростає. Збільшення маси рулонів, особливо при прокатці жерсті і штаб малої товщини, не відноситься до числа факторів, що значно впливають на середньогодинну продуктивність. Оскільки найбільш інтенсивне зростання середньогодинної продуктивності двохкільцевих реверсивних станів при виробництві прокату їх основного сортаменту спостерігається в діапазоні зміни швидкості прокатки 20–25 м/с, максимальна проектна швидкість в 22,5 м/с цих станів є обґрунтованою і доцільною. При виробництві жерсті і тонких штаб маса рулонів на рівні 25–28 т забезпечує прийнятно високий рівень середньогодинної продуктивності при веденні процесу на швидкості до 20–25 м/с і може розглядатися як необхідна і достатня. Збільшення маси рулонів до 30–36 т доцільне при проектуванні двохкільцевих реверсивних станів для випуску продукції різноманітного сортаменту об'ємом до 0,9–1 млн т на рік.

Наведена в статті методика розрахунку середньогодинної продуктивності на двохкільцевих реверсивних станах і отримані з її допомогою матеріали можуть бути використані при обґрунтуванні сортаменту і визначенні параметрів технології і основного обладнання двохкільцевих реверсивних станів холодної прокатки 1400 і 1750, спорудження яких актуально для України.

Ключові слова

Холодна прокатка, двохкільцевий реверсивний стан, технологія, продуктивність, параметр, швидкість, маса.

Ya.D. Vasilev, Doctor of Engineering Sciences, Professor
R.A. Zamogilny, Junior Researcher, e-mail: rz90@i.ua
V.A. Grinkevich, Doctor of Engineering Sciences, Professor

National Metallurgical Academy of Ukraine (NMetAU), Dnipro, Ukraine

Influence of technological parameters of the cold striping process on the productivity of two-stand reversible mills

The influence of technological parameters in the production of cold-rolled steel of the main assortment on the average hourly productivity on two-stand reversing mills is investigated. It was established that when rolling tinplate and thin strips of 0.16–1.0 mm thick with a conditional width of 1000 mm at a speed of 10–30 m/s from rolls of a 15–35 ton bale, the average hourly productivity of these mills varies in the range from 30 to 215 tons.

It is shown that during rolling of tinplate and strips of small thickness from coils of constant weight, the main influence on the level of average hourly productivity is rendered by the speed of rolling, and this effect increases with decreasing strip thickness. Increasing the mass of coils, especially when rolling tinplate and thin strips, is not one of the factors that have a decisive influence on the average hourly productivity. Since the most intensive growth of the average hourly productivity of two-stand reversible mills in the production of rolled products of their main assortment is observed in the range of rolling speeds of 20–25 m/s, the maximum design speed of 22.5 m/s of these mills is reasonable and expedient. In the production of tinplate and thin strips, the mass of coils at the level of 25–28 tons provides an acceptably high level of average hourly productivity when the process is conducted at a speed of up to 20–25 m/s and can be considered necessary and sufficient. Increasing the mass of coils to 30–36 tons seems reasonable when designing two-section reversing mills for the production of products of various sizes up to 0.9–1 million tons per year.

The method for calculating the average hourly productivity on two-stand reversing mills and the materials obtained with it can be used to justify the assortment and determine the parameters of the technology and the main equipment of the two-stand cold rolling mills 1400 and 1750, the construction of which is important for Ukraine.

Cold rolling, two-stand reversing mill, technology, productivity, parameter, velocity, mass.

Моделирование очистки поверхностей потоком абразивных частиц

Описаны особенности использования системы математического моделирования, которая включает математическое моделирование, разработку конструктивно-технологических предложений и оптимизацию параметров оснастки при создании технологической оснастки для очистки поверхностей потоком абразивных частиц на примере очистки отверстий малого диаметра в деталях гидравлического привода.

Оценка и подтверждение адекватности математической модели выполнено с помощью критерия проверки соответствия для малых выборок. В качестве критерия оптимизации принята интенсивность съема материала с элементарной площадки поверхности при суммарном воздействии достаточно большого количества абразивных частиц. Оптимизируемыми технологическими параметрами являются величины зернистости абразива и скорости частиц потока, обеспечивающие максимальную интенсивность съема материала. Технической документацией не предусматриваются специальные требования к величине шероховатости поверхности отверстий, поэтому в условиях данной задачи ограничение по шероховатости принимает особый вид условия невозрастания шероховатости при обработке. Установленные конструктивно-технологические параметры оснастки, обеспечивающие стабильное получение однородных очищенных внутренних поверхностей поршней аксиально-поршневых гидромашин, использованы в конструкции оснастки и технологии ее применения. В технологический процесс изготовления поршней на заводе-изготовителе аксиально-поршневых гидромашин введена операция очистки отверстий после химико-термической обработки с использованием предложенной технологической оснастки.

Такой подход является универсальным по отношению к форме поверхностей и виду математической модели, обеспечивает необходимый уровень точности и позволяет эффективно решать практические задачи создания технологической оснастки для повышения качества очистки поверхностей.

Ключевые слова: моделирование, очистка, поверхность, поток, абразив, оснастка.

Для очистки поверхностей деталей после термической и химико-термической обработки может эффективно использоваться обработка потоком абразивных частиц, которая реализуется с помощью специальной технологической оснастки. Для создания такой оснастки следует применять систему математического моделирования [1, 4, 5], которая включает:

- математическое моделирование (целеполагание, идеализацию, формализацию, идентификацию, проверку адекватности);
- разработку конструктивно-технологических предложений;
- оптимизацию параметров оснастки.

Рассмотрим основные общие методические особенности решения подобной задачи.

Математическое моделирование

Целеполагание. Создать математическую модель, учитывающую основные конструктивно-технологические факторы, влияющие на результаты использования оснастки. Погрешность моделирования не более 5 %. Стоимость моделирования не должна превышать 5 % стоимости продукции, для изготовления которой используется оснастка.

Идеализация. Процесс очистки упрощенно можно рассматривать как многократное контактное взаимодействие поверхности детали и элементов абразивного потока, которое может быть описано универсальной математической моделью, основанной на

модели [1] элементарного единичного акта контактного взаимодействия (рисунок). Модель включает четыре блока:

- модель обрабатываемой поверхности;
- модель абразивного потока;
- модель кинематических и динамических особенностей взаимодействия;
- модель изменения свойств поверхности после взаимодействия.

Учитывая практически однородный характер явлений, исследовался съем материала с элементарной площадки поверхности при воздействии отдельных $g_i(d, v)$ абразивных частиц. Основными технологическими параметрами являются величины зернистости

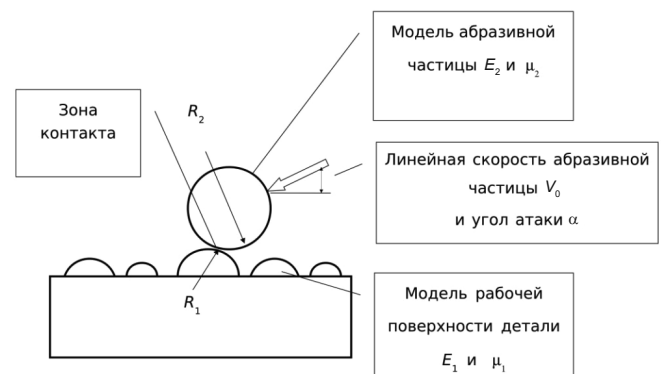


Рис. 1. Упрощенная схема элементарного единичного акта контактного взаимодействия

абразива (d) и скорости частиц потока (v). Особенностью изучаемого процесса является случайный характер этих величин. Многократное воспроизведение единичных актов (500) позволяет оценить взаимодействие при очистке во времени. При этом параметры поверхности, абразивной частицы (принимается в виде сферы) и абразивного потока для единичного акта определяются как реализации случайных величин с нормальным законом распределения вероятностей с соответствующими параметрами.

Формализация. В основе математической модели, позволяющей оценивать величину съема материала, лежит [1] модель Герца, определяющая значения (1) максимального сближения $X_{\max}$ с учетом деформирования пропорционального твердости контактирующих поверхностей (рисунок) в виде сферических сегментов с радиусами R_1 и R_2 по формуле:

$$X_{\max} = \left(\frac{5mV_0}{4\beta} \right)^{2/5},$$

$$\beta = \frac{2E_1E_2}{3E_1(1-\mu_2^2) + E_2(1-\mu_1^2)} \sqrt{\frac{R_1R_2}{R_1+R_2}}, \quad (1)$$

где m – масса абразивной частицы; V_0 – линейная скорость абразивной частицы; E_1 и E_2 , μ_1 и μ_2 – модули упругости и коэффициенты Пуассона материалов контактирующих поверхностей, соответственно.

Оценкой величины съема материала (2) со сферического элемента является объем шарового сегмента, имеющего высоту стрелки, равную половине величины деформации элемента при контактом взаимодействии, при условии, что напряжения при контактом взаимодействии превосходят допустимые напряжения среза для конкретного материала:

$$G = \frac{\pi}{12} (4X_{\max}^3 + 6R_{1,2}X_{\max}^2). \quad (2)$$

Выходные переменные математической модели при достаточно большом (не менее 100) количестве реализаций являются случайными величинами, имеющими нормальный закон распределения вероятностей, что соответствует общим положениям математической статистики. С помощью базовой математической модели, которая учитывает геометрические и физико-механические свойства поверхности (T_1 – твердость материала детали) и абразивной частицы (T_2 – твердость материала частицы), особенности контактного взаимодействия, съема материала и случайный характер переменных можно получить оценки (2) и (3) математического ожидания G и среднего квадратического отклонения σ_G величины съема материала:

$$\sigma_G = \frac{1}{6} G \left[\frac{12\Delta m}{5m} + \frac{12\Delta V_0}{5V_0} + \frac{6}{5(R_1+R_2)} \left(\frac{R_2}{R_1} \Delta R_1 + \frac{R_1}{R_2} \Delta R_2 \right) + \frac{3(\Delta T_1 + \Delta T_2)}{T_1 + T_2} \right] \quad (3)$$

Идентификация. Для определения численных значений параметров математической модели (что и составляет суть идентификации) необходимо конкретизировать свойства объекта очистки. Например, для очистки осевых отверстий малого диаметра (две ступени диаметром 1 и 2 мм общей длиной 45 мм) в плунжерах аксиально-поршневых гидравлических машин параметры могут быть установлены на основании априорной (эмпирической и справочной) информации.

Проверка адекватности. Для количественной оценки соответствия модели съема материала, использован интегральный (учитывающий две основные выходные переменные) показатель (4):

$$\Delta_{\Sigma} = \left(\left| \frac{R_z^a - R_z^p}{R_z^a} \right| + \left| \frac{G_n^a - G_n^p}{G_n^a} \right| \right) \cdot 100, \quad (4)$$

где R_z^a и G_n^a , R_z^p и G_n^p – величины шероховатости и съема, полученные при натурном и имитационном экспериментах, соответственно.

Сравнение значений показателя (4) с помощью критерия [2] проверки соответствия для малых выборок (табл. 1) подтверждает наличие адекватности.

Математическое моделирование позволило определить основные особенности абразивной обработки, а также направления и принципиальные решения при создании специальной технологической оснастки.

Таблица 1

Результаты проверки адекватности

Варианты экспериментов	Выходная переменная модели	$\xi_{\max}$	$\xi_{\min}$
1	2,99458	3,031	2,749
2	3,06402	3,101	2,819
3	2,23457	2,271	1,989
4	2,88934	2,921	2,639

Разработка конструктивно-технологических предложений. Для гарантированной очистки поверхностей отверстий малого диаметра 0,6÷2 мм после химико-термической обработки (в частности, азотирования) прецизионных деталей гидравлического привода предложена [5] специальная технологическая оснастка, которая реализует результаты математического моделирования. Комплект обрабатываемых деталей (18 штук) устанавливается на специальных ложементов и погружается в суспензию абразива определенной концентрации. Гидроабразивный поток в течение заданного времени проходит через отверстия в деталях и производит очистку поверхностей.

Оптимизация конструктивно-технологических параметров использования оснастки основывается на разработанных математических моделях и общих рекомендациях [3] по оптимизации параметров технологических процессов.

В качестве критерия оптимизации принята интенсивность съема материала G (d , v) с элементарной площадки поверхности при суммарном воздействии

достаточно большого количества (500) абразивных частиц $g_i(d, v)$. Оптимизируемыми технологическими параметрами являются величины зернистости абразива (d) и скорости частиц потока (v), обеспечивающие максимальную интенсивность съема материала. Технической документацией не предусматриваются специальные требования к величине шероховатости R_z поверхности отверстий, поэтому в условиях данной задачи ограничение по шероховатости принимает особый вид условия невозрастания шероховатости при обработке.

Таким образом, формулировка задачи оптимизации имеет вид:

$$G(d, v) = \sum_{i=1}^{500} g_i(d, v) \rightarrow \max;$$

$$R_{zi} \leq R_{zi-1}. \quad (5)$$

Начальная область изменения оптимизируемых параметров (табл. 2) установлена с учетом имеющихся сведений, полученных при предварительных натурных экспериментах на лабораторной установке.

Имитационные эксперименты многократно повторяются с помощью ЭВМ при различных случайных значениях параметров (с заданными законами распределения вероятностей, воспроизводимым специальными датчиками псевдослучайных чисел) для каждого сочетания областей значений параметров.

Выполнение условий оптимизации достигается при шестом имитационном эксперименте (см. табл. 2). Оптимальными значениями технологических параметров являются:

- средний диаметр частиц 50 мкм (соответствует стандартной зернистости – 100 мкм);
- средняя скорость абразивных частиц – не менее 70 м/с.

Установленные конструктивно-технологические параметры оснастки, обеспечивающие стабильное получение однородных очищенных внутренних поверхностей поршней аксиально-поршневых гидромашин, использованы в конструкции оснастки и технологии ее применения. В технологический процесс изготовления поршней на заводе-изготовителе ак-

Последовательность оптимизации

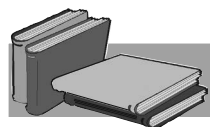
Уровни	Средний диаметр частиц, мкм	Средняя скорость потока, м/с	Съем металла, кг
Верхний	32	65	
Нижний	23	55	
1	+	+	$1,040322 \cdot 10^{-10}$
2	-	+	$0,325995 \cdot 10^{-10}$
3	+	-	$0,776445 \cdot 10^{-10}$
4	-	-	$0,196988 \cdot 10^{-10}$
Параметры градиента			
	$0,3234 \cdot 10^{-10}$	$0,9822 \cdot 10^{-10}$	
Шаг движения по градиенту			
	7	2,35	
Движение по градиенту			
5	39	67,35	$2,171544 \cdot 10^{-10}$
6	46	69,7	$3,918538 \cdot 10^{-10}$

сиально-поршневых гидромашин введена операция очистки отверстий после химико-термической обработки с использованием предложенной технологической оснастки.

Для определения оптимальных условий очистки поверхностей потоком абразивных частиц целесообразно промоделировать процесс с использованием системы математического моделирования, которая включает:

- математическое моделирование (целеполагание, идеализацию, формализацию, идентификацию, проверку адекватности);
- разработку конструктивно-технологических предложений;
- оптимизацию параметров оснастки.

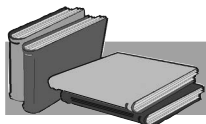
Такой подход является универсальным по отношению к форме поверхностей и виду математической модели, обеспечивает необходимый уровень точности и позволяет эффективно решать практические задачи создания технологической оснастки для повышения качества очистки поверхностей.



ЛИТЕРАТУРА

1. Проволоцкий А.Е., Ясев А.Г., Гришин В.С., Маринченко И.А. Имитационное моделирование процесса обработки потоком абразивных частиц // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. – 1987. – № 4. – С. 112–117.
2. Ясев А.Г. Соответствие математических моделей и технологических процессов в металлургии и машиностроении. – Днепропетровск: Днепр-VAL, 2001. – 237 с.
3. Ясев А.Г. Применение методов оптимизации технологических процессов. С. 163–217 // *Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения* / Под общей редакцией Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т. 8: «Оптимизация технологических процессов в машиностроении». – Одесса: ОНПУ, 2004. – 509 с.
4. Ясев А.Г. Система математического моделирования технологической оснастки для очистки отверстий малого диаметра в деталях элементов гидравлического привода // *Математичне моделювання*. – 2009. – № 2. – С. 34–38.
5. А. с. № 1280814. СССР, МКИ В 24 С 3/16/. Гидроабразивная установка для обработки внутренних поверхностей деталей типа труб / В.Н. Морозенко, И.П. Онуфриенко, А.Е. Проволоцкий, В.П. Капустенко, В.А. Захарченко, А.А. Ворохов, В.С. Гришин, Г.М. Быков, А.Г. Ясев (СССР). – № 3905104/08; Заяв. 16.04.1985.

Поступила 28.01.2019



REFERENCES

1. Provolotskiy, A.E., Yasev, A.G., Grishin, V.S., Marinchenko, I.A. (1987). Imitation modeling of process of treatment by the stream of abrasive particles. *Izvestiia vusshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie*, no. 4, pp. 112–117 [in Russian].
2. Yasev, A.G. (2001). Accordance of mathematical models and technological processes in metallurgy and engineering. Dnepropetrovsk: Dnepr-VAL, 237 p. [in Russian].
3. Yasev, A.G. (2004). Application methods of optimization technological processes. pp. 163–217. *Physical and mathematical theory of processes of treatment materials and technologies of engineering*. Under a general editorship of F.V. Novikov and A.V. Yakimov. In ten volumes. Vol. 8: "Optimization of technological processes in engineering". Odesa: ONPU, 509 p. [in Russian].
4. Yasev, A.G. (2009). System of mathematical modeling technological equipment for cleaning opening of small diameter in details of elements of hydraulic drive. *Mathematical modeling*, no. 2, pp. 34–38 [in Russian].
5. Morozenko, V.N., Onufrienko, I.P., Provolotskiy, A.E., Kapustenko, V.P., Zakharchenko, V.A., Vorokhov, A.A., Grishin, V.S., Bykov, G.M., Yasev, A.G. (1985). Hydroabrasive equipment for treatments of internal surfaces in details like pipes. A. s. no. 1280814. USSR, MKI B 24 C 3/16/, no. 3905104/08; Declared 16.04.1985 [in Russian].

Received 28.01.2019

Анотація

О.Г. Ясев, канд. техн. наук, проф., проф. кафедри прикладної математики та обчислювальної техніки, e-mail: navid@metal.dmeti.dp.ua, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2614-6994>, Researcher ID: 6506486955

Національна металургійна академія України, Дніпро, Україна

Модельовання очищення поверхонь потоком абразивних часток

Описано особливості використання системи математичного моделювання, що включає математичне моделювання, розробку конструктивно-технологічних пропозицій і оптимізацію параметрів оснащення при створенні технологічного оснащення для очищення поверхонь потоком абразивних часток на прикладі очищення отворів малого діаметра в деталях гідравлічного приводу.

Оцінку і підтвердження адекватності математичної моделі виконано за допомогою критерію перевірки відповідності для малих вибірок. У якості критерію оптимізації прийнято інтенсивність знімання матеріалу з елементарного майданчика поверхні при сумарній дії досить великої кількості абразивних часток. Технологічними параметрами, що оптимізуються, є величини зернистості абразиву і швидкості часток потоку, що забезпечують максимальну інтенсивність знімання матеріалу. Технічною документацією не передбачаються спеціальні вимоги до величини шорсткості поверхні отворів, тому в умовах цього завдання обмеження по шорсткості набирає особливого вигляду умови незростання шорсткості при обробці. Встановлені конструктивно-технологічні параметри оснащення, що забезпечують стабільне отримання однорідних очищених внутрішніх поверхонь поршнів аксіально-поршневих гідромашин, використано в конструкції оснащення і технології її застосування. У технологічний процес виготовлення поршнів на заводі-виготовнику аксіально-поршневих гідромашин введено операцію очищення отворів після хіміко-термічної обробки з використанням запропонованого технологічного оснащення.

Такий підхід є універсальним по відношенню до форми поверхонь і виду математичної моделі, забезпечує необхідний рівень точності і дозволяє ефективно вирішувати практичні завдання створення технологічного оснащення для підвищення якості очищення поверхонь.

Ключові слова

Модельовання, очищення, поверхня, потік, абразив, оснащення.

A.G. Yasev, Candidate of Engineering Sciences, Prof., Professor at the Department of applied mathematics and computer facilities,
e-mail: navid@metal.dmeti.dp.ua, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2614-6994>, Researcher ID: 6506486955

National metallurgical academy of Ukraine, Dnipro, Ukraine

Modeling of cleaning surfaces by the stream of abrasive particles

Utilization of system of mathematical modeling, which consists of mathematical modeling, creation of constructional and technological propositions and optimization parameters of equipment during the creation of technological equipment for cleaning surfaces by the stream of abrasive particles on the example of cleaning holes with small diameters in details of elements of hydraulic machines is described.

Estimation and confirmation of adequacy of mathematical model are executed by means of criterion of verification of accordance for small selections. As a criterion of optimization intensity of output of material is accepted from the elementary ground of surface at total influence of plenty enough of abrasive particles. The optimized technological parameters are sizes of grittiness of abrasive and speeds of particles of stream, providing maximal intensity of output of material. Technical documentation is not envisage the special requirements to the roughness of surface of opening, therefore in the conditions of this task limitation on a roughness assumes a special air of condition of ungrowth of roughness at treatment. Set structurally-technological parameters, rigging providing the stable receipt of the homogeneous cleared internal surfaces of pistons of axialpiston hydromashines is used in the construction of rigging and technology of its application. In the technological process of making of pistons on the plant-manufacturer of axialpiston hydromachines the operation of cleaning of opening is entered after chemical-thermal treatment with the use of the offered technological equipment.

Such approach is universal in relation to the form of surfaces and type of mathematical model, provides the necessary level of exactness and allows effectively solve the practical tasks of creation of the technological equipment for upgrading cleaning of surfaces.

Keywords

Modeling, cleaning, surface, stream, abrasive, equipment.

Новый высокоэффективный энергосберегающий комплекс газоочистного оборудования для проведения регулируемой очистки выбросов от машин и агрегатов металлургических производств. Сообщение 1

Рассмотрена конструкция комплекса газоочистного оборудования, позволяющая в условиях металлургических производств оказывать активное неоднородно-избирательное воздействие на обрабатываемую среду – отводимые от металлургических плавильных агрегатов технологические газовые выбросы, для снижения расхода энергоресурсов (электроэнергии, воды) в процессе очистки технологических выбросов и капитальных затрат. Основные составляющие узлы разработанной конструкции данного комплекса представлены в виде энергоемкого регулируемого тандема установок мокрой газоочистки (ЭРТУМГ), сформированных тождественными структурными узлами и элементами, газоотводящие тракты которых соединены коллекторным газоходом, снабженным автоматически регулируемым запорным клапаном. В коллекторах подачи оборотной воды в аппарат мокрой газоочистки, на входах в скруббер и блок труб Вентури (ЭРТУМГ) установлены датчики расхода воды и автоматизированные регулируемые дроссельные задвижки, управление приводом которых связано с пультом управления металлургического агрегата, что обеспечивает непосредственную прямозависимую связь параметров работы газоочистки с фазой технологического цикла, в котором находится данный металлургический агрегат. В газоходах очищенного газа газоотводящих трактов (ЭРТУМГ) установлены датчики расхода очищенного газа и автоматически регулируемые запорные клапаны, управление приводом которых также связано с пультом управления металлургического агрегата, для обеспечения прямозависимой связи параметров работы газоочистки от фазы технологического цикла металлургического агрегата. Разработанный комплекс газоочистного оборудования предназначен для эксплуатации в условиях кислородно-конвертерных цехов металлургических предприятий и учитывает специфику и режимы работы существующего технологического оборудования: емкость, производительность и технологические режимы работы установленных конвертеров.

Ключевые слова: установка мокрой газоочистки, производительность, энергосбережение, пылегазовый выброс, скруббер, эксгаустер, разрежение, датчик расхода воды, автоматизированная дроссельная задвижка, запорный клапан.

Постановка проблемы. В современных производственных условиях, в связи с постоянным повышением цен на энергоносители и усилением экологических требований, все большее внимание уделяется поиску новых путей оптимизации процессов пылегазоочистки технологических и аспирационных газовых выбросов.

При этом появляется актуальная потребность в создании высокоэффективной энергосберегающей системы отвода газовых выбросов, способной в процессе функционирования обеспечить необходимую

степень очистки отводимых газов, и при этом максимально эффективно использовать энергоресурсы (электроэнергию, воду), в процессе очистки дымовых газов и других продуктов сгорания, образующихся при работе различных типов машин и агрегатов металлургических производств [1].

Практически все современные металлургические плавильные агрегаты снабжены газоотводящими трактами (рис. 1), которые обеспечивают охлаждение и очистку отводимых от них газов или их продуктов сгорания.

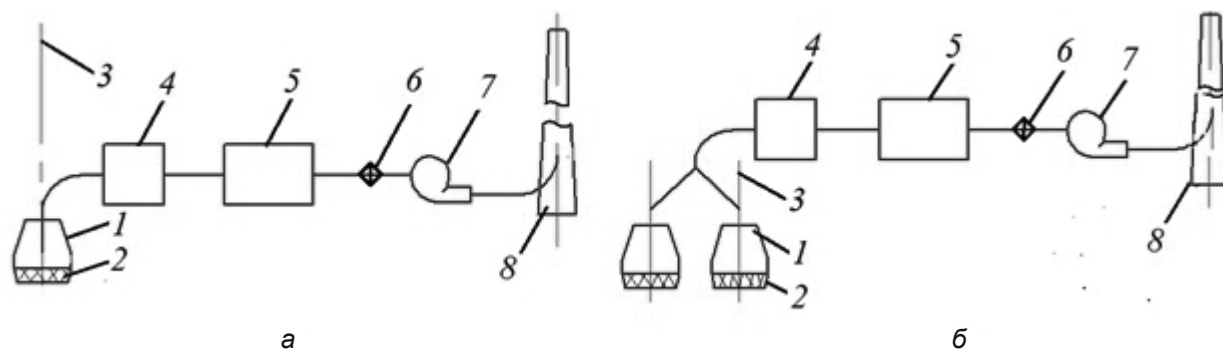


Рис. 1. Схема газоотводящего тракта 1-го кислородного конвертера (а), а также 2-х конвертеров (б), работающих на один газоотводящий тракт: 1 – конвертер; 2 – металлургическая шихта; 3 – кислородная фурма; 4 – охладитель; 5 – газоочистка; 6 – заслонки; 7 – эксгаустер; 8 – дымовая труба

Длительный период времени в условиях металлургических производств используются системы пылегазоочистки, в которых для проведения процесса очистки пылегазовых выбросов от каждого, отдельно взятого металлургического плавильного агрегата, задействован свой индивидуальный газоотводящий тракт (рис. 2).

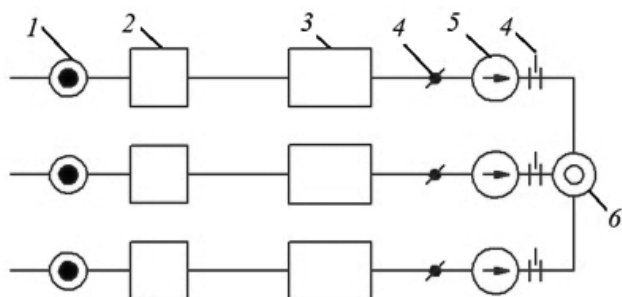


Рис. 2. Структурная схема индивидуальных газоотводящих трактов для группы из 3-х конвертеров, с общим бором и общей дымовой трубой: 1 – конвертер; 2 – охладитель; 3 – система газоочистки; 4 – заслонки; 5 – эксгаустер; 6 – дымовая труба

Согласно [2], для проведения процесса газоочистки каждого отдельно взятого металлургического плавильного агрегата используются несколько основных составных структурных узлов (элементов), формирующих компоновку данного газоотводящего тракта. Это охладитель газовых выбросов, устройства для очистки выбросов, дымо- или газопроводы с запорно-регулирующей арматурой между элементами тракта, эксгаустер (дымосос), дымовые трубы, клапан для подачи в газольдер, бустер, газовые фильтры. При этом, для групп кислородных конвертеров, газоходы очищенного газа их газоотводящих трактов после эксгаустеров могут объединяться и иметь общие дымовые боровы и дымовую трубу, через которую продукты сгорания выбрасываются в атмосферу.

На рис. 3 представлена классическая компоновка индивидуального газоотводящего тракта кислород-

ных конвертеров ЧАО «Енакиевский Металлургический Завод», работающая с двумя влагоотделителями, общими бором и дымовой трубой, при полном дожигании окиси углерода (CO) в отводимых газах ($\alpha \geq 1$) и с мокрой газоочисткой. В данной рассматриваемой системе газоочистки используются эксгаустеры, рассчитанные на отвод газов, выделяющихся при максимальной производительности для каждой единицы технологического оборудования, причем даже в том случае, когда потребность в ней возникает на незначительный период времени, составляющий (5–50 %) от времени его работы. При этом большая часть металлургических агрегатов имеет именно циклическую производительность, с чередующимися фазами максимальных/минимальных выбросов.

Недостатком данной системы пылегазоочистки является невозможность эффективного использования мощностей установленного тягодутьевого оборудования и нерациональный расход воды на систему очистки выбросов, при удалении технологических газовых выбросов одновременно от нескольких (2-х и более) плавильных агрегатов (в частности кислородных конвертеров) в зависимости от их фактических режимов работы, а именно, от режимно-временных периодов проведения в них плавов [3].

Например, когда один металлургический плавильный агрегат (конвертер) находится в активной фазе выделения загрязняющих веществ – работает в режиме продувки кислородом, а другой агрегат в данном временном отрезке не производит интенсивного выброса загрязняющих веществ – находится в режиме слива железо-углеродистого расплава или завалки в него составных компонентов металлургической шихты. При этом тягодутьевое оборудование (эксгаустеры), а также системы подачи воды в трубы Вентури и охладитель, на обоих конвертерах продолжают работать на максимальной мощности, что приводит к нерациональному использованию 30–40 % энергоресурсов (воды, электроэнергии), поступающих суммарно на две системы газоудаления и очистки выбросов от этих конвертеров.

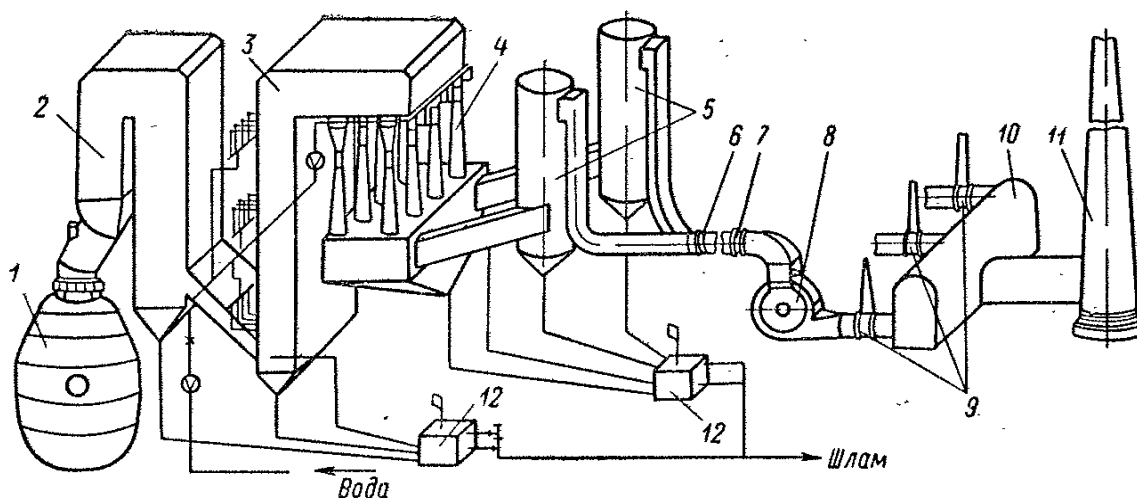


Рис. 3. Аксонометрическая схема-компоновка газоотводящего тракта кислородных конвертеров ЧАО «Енакиевский Металлургический Завод»: 1 – конвертер; 2 – охладитель; 3 – скруббер; 4 – трубы-распылители Вентури; 5 – циклон-влагоотделитель; 6 – измерительная труба; 7 – дроссельная заслонка; 8 – эксгаустер; 9 – отсекающая задвижка; 10 – общий боров; 11 – дымовая труба; 12 – гидрозатворы

Для решения вышеизложенного комплекса проблем традиционных конструкций пылегазоочистных установок, одним из перспективных направлений является разработка новых способов пылегазоочистки, совершенствование систем КИПиА и АСУ ТП, а также модернизация систем отвода, охлаждения и очистки технологических газовых выбросов от работающих металлургических агрегатов.

Анализ последних исследований и публикаций. В условиях металлургических и коксохимических предприятий Украины и стран СНГ, в промышленности нерудных строительных материалов, а также на электросталеплавильных печах и ферросплавных заводах имеется большой положительный опыт использования различных конструкций пылегазоулавливающих систем и разных типов пылегазоочисток [4–6].

Составные структурные узлы и элементы данных технических устройств изготовлены из стойких к усталостному износу конструкционных материалов, обладают возможностью компактного размещения в стесненных условиях существующих промышленных площадок, и в процессе эксплуатации производят активное очищающее воздействие на обрабатываемую среду [7].

В тоже время особую актуальность приобретает возможность достижения более высоких показателей энергоэффективности процесса очистки технологических газов и неорганизованных газовых выбросов в металлургических производствах. Существенное улучшение показателей энергоэффективности, при проведении очистки газовых выбросов, может быть достигнуто за счет применения в перспективных конструкциях пылегазоочистного оборудования «динамически активной» регулируемой системы очистки выбросов, использующей принцип рационального перераспределения газовых потоков и энергоресурсов, в зависимости от потребности технологического оборудования.

Потенциально регулирование объемов формирующихся потоков охлажденных и очищенных дымовых газов может осуществляться как в автоматическом, так и в ручном режиме, когда обслуживающий персонал самостоятельно переключает систему газоочистки в зависимости от текущего состояния технического процесса.

Однако практическое применение «динамически активной» регулируемая система очистки выбросов, в газоотводящих трактах которой создана возможность рационально перераспределять потоки охлаждающегося и очищенного газа, может получить только в автоматизированных системах. Это связано с тем, что изменение параметров работы технологического оборудования происходит через относительно короткие промежутки времени, и связанная с данным технологическим оборудованием «динамически активной» регулируемая система очистки выбросов должна обеспечить быстрое реагирование на изменение ситуации, синхронно перераспределяя газовые потоки и энергоресурсы.

Поэтому новые разновидности конструкций регулируемых газоочистных комплексов, предназначенных для мокрой или сухой очистки технологических газовых выбросов от машин и агрегатов металлургических производств, должны быть автоматически

регулируемыми, с целью обеспечения прямозависимой связи параметров работы газоочистки от фазы технологического цикла плавильного металлургического агрегата. Такая автоматизированная система позволит органично сочетать низкие и стабильные во времени показатели расхода энергетических ресурсов с таким важным техническим и экологическим показателем, как требуемая эффективность процесса газоочистки.

В кислородных конвертерах сталеплавильного передела современного металлургического предприятия временная длительность – полный цикл проведения конвертерной плавки, составляет 45–60 минут и включает три основных периода:

- завалку в конвертер шихтовых материалов – жидкого чугуна, металлолома и т. д., с незначительным выделением загрязняющих веществ;
- продувку жидким кислородом и подачу шлакообразующих материалов, характеризующуюся наибольшим выделением загрязняющих веществ;
- слив полученного железо-углеродистого расплава с незначительным выделением загрязняющих веществ.

Таким образом, разработанная «динамически активная» автоматически регулируемая система комплекса установок мокрой газоочистки должна обладать рядом важных положительных особенностей и преимуществ, проявляющихся в процессе ее использования в сталеплавильном переделе современных металлургических производств, а именно:

- создание оптимальных условий в газоотводящем тракте для установки мокрой газоочистки, находящейся в активной рабочей фазе в продувочном периоде конвертерной плавки, – увеличенное разрежение в газовом тракте и увеличенная подача охлаждающе-очищающей воды;

- обеспечение энергоресурсосбережения (фактическое снижение потребления объемов охлаждающе-очищающей воды и электроэнергии), за счет уменьшения разрежения в газоотводящем тракте установки, находящейся в пассивной рабочей фазе (первый и третий периоды конвертерной плавки, – режимы завалки в кислородный конвертер составных компонентов металлургической шихты или слива из него железо-углеродистого расплава), характеризующейся незначительным выделением загрязняющих веществ.

Цель (задачи) исследований. Целью настоящей работы является разработка новой конструкции комплекса газоочистного оборудования для проведения энергоэффективного автоматически регулируемого пылегазоудаления и очистки выбросов от машин и агрегатов современных металлургических производств, получившей название энергоемкого регулируемого тандема установок мокрой газоочистки – ЭРТУМГ (рис. 4).

Разработанная, в рамках проведенных исследований, конструкция (ЭРТУМГ) имеет усовершенствованную систему подачи и перераспределения охлаждающе-очищающей оборотной воды, а также обладает переменной производительностью по отводимым на очистку и очищенным газовым выбросам, благодаря созданию в ее газоотводящих трактах (в

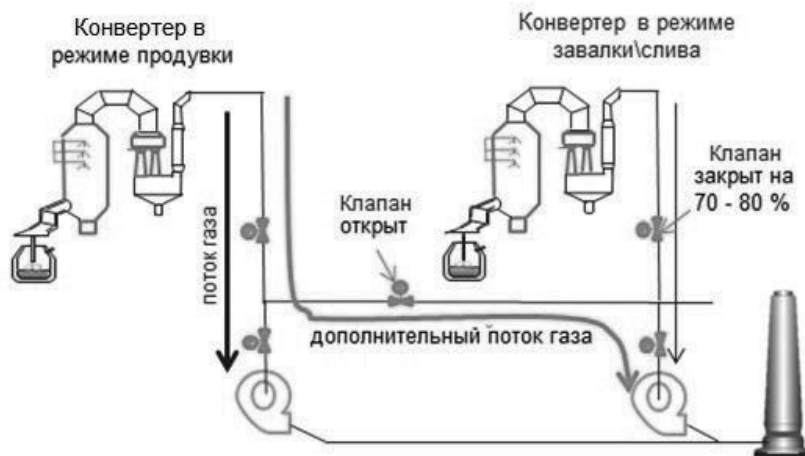


Рис. 4. Новая конструкция комплекса газоочистного оборудования, разработанная для проведения энергоэффективного автоматически регулируемого пылегазоудаления и очистки выбросов от машин и агрегатов современных металлургических производств – энергоемкий регулируемый тандем установок мокрой газоочистки – (ЭРТУМГ)

общем коллекторном газоходе) дополнительного регулируемого газового потока.

Данные отличительные особенности позволяют (ЭРТУМГ) производить активное неоднородно-избирательное воздействие на обрабатываемую среду – отводимые от плавильных машин и агрегатов пылегазовые выбросы.

Основной материал исследований. (ЭРТУМГ) в качестве унифицированного тягодутьевого пылегазоочистного комплекса предназначен для использования в различных видах металлургических производств, с целью обеспечения эффективной очистки выбросов и снижения капитальных инвестиций, а также снижения операционных расходов и расходов энергоносителей, что позволит дополнительно уменьшить вредное воздействие на окружающую среду.

С учетом условий эксплуатации и специфики технологического оборудования – кислородных конвертеров и агрегатов ЧАО «Днепропетровский Металлургический Завод», разработанная конструкция (ЭРТУМГ) рекомендована к использованию в условиях участка газоочистки кислородно-конвертерного цеха (ККЦ), с показателем запыленности дымовых газов до очистки 60 г/м^3 , для получения показателя запыленности очищенных дымовых газов $\leq 0,1 \text{ г/м}^3$ в пересчете на сухой газ.

При этом отвод газовых выбросов от кислородных конвертеров ЧАО «ДМЗ» осуществляется с доступом воздуха и с полным дожигом СО ($\alpha \geq 1$), без утилизации и дальнейшего использования тепла продуктов сгорания.

Основой, взятой для разработки (ЭРТУМГ), стал способ отвода конверторных газов [8], включающий охлаждение, мокрую газоочистку, отсос дымовых газов с помощью эксгаустера (дымососа), с возможностью регулирования производительности основного газоотводящего тракта благодаря эжектированию части дымовых газов по обводному тракту, с использованием в эжекторе пара от охладителя конверторных газов. При этом производительность основного газоотводящего тракта является постоянной, а регулирование отвода избыточных газов (с дожиганием или без дожигания) производится эжекционной трубой Вентури, работающей на перегретой воде.

Регулирование отвода избыточных газов с дожиганием СО производится благодаря регулированию расхода перегретой воды в эжекционной трубе Вентури по импульсу перепада давления газа на мокрой газоочистке с эксгаустером, а без дожигания СО – благодаря регулированию расхода перегретой воды в эжекционной трубе Вентури по импульсу давления газа, зафиксированного на входе в газоотводящий тракт.

Система для осуществления – установка для реализации данного способа отвода конверторных газов состоит из котла-охладителя, мокрой газоочистки, регулирующего органа и эксгаустера, и также имеет эжекционную трубу Вентури, установленную параллельно мокрой газоочистке и эксгаустеру (дымососу), работающую на перегретой воде благодаря ее соединению через смешивающий подогреватель с паропроводом котла-охладителя.

Прототипом при создании конструкции (ЭРТУМГ) стало также устройство [9], содержащее, по меньшей мере, две автономные установки газоочистки, газоотводящий тракт каждой из которых содержит: газоходы очищаемого и очищенного газа, аппарат газоочистки, оснащенный средствами для накопления и вывода уловленной пыли, эксгаустер (дымосос) и дымоход. В газоходах очищаемого и очищенного газа, перед и после аппаратов газоочистки, установлены дистанционно управляемые микропроцессорным блоком запорные клапаны, а газоходы очищаемого газа снабжены датчиками температуры и запыленности газа, которые соединены с микропроцессорным блоком управления запорными клапанами.

При этом соседние газоходы очищаемого газа на участках, расположенных между управляемыми запорными клапанами и аппаратами газоочистки, соединены между собой дополнительным дымоходом с управляемым запорным клапаном. Кроме того, соседние газоходы очищенного газа на участках, расположенных между аппаратами газоочистки и управляемыми запорными клапанами, также соединяются между собой дополнительным газоходом с управляемым запорным клапаном.

Основными структурными функциональными узлами газоотводящих трактов разработанной установки ЭРТУМГ являются:

1. *Водоохлаждаемые газоходы очищаемого газа (кессоны)* – многокомпонентные сварные металлоконструкции, имеющие в плане вид конусных патрубков переменного поперечного сечения, снабженных поперечными вырезами для прохода Г-образных фурм, подающих кислород в ванны, и специальными окнами для подачи сыпучих присадок.

2. *Полые охлаждающие противоточные скрубберы* – имеющие 3 яруса орошения 3-х дюймовыми эвольвентными форсунками теплообменные аппараты цилиндрической формы с внутренними Ø 3400 мм, цилиндрические части которых внизу заканчиваются конусами с вертикально врезанными трубами Ø 700 мм, оборудованными в своих нижних частях специальными гидравлическими затворами.

3. *Трубы-распылители* – представляющие собой блоки вертикально расположенных, оборудованных 3-х дюймовыми эвольвентными форсунками и идентичных друг другу 5-ти высоконапорных труб Вентури, изготовленных из нержавеющей стали с толщиной стенок 10 мм, с Ø горловины 360 мм, и с центральным впрыском в них очищающей оборотной воды.

4. *Первичные каплеуловители* – предназначенные для задержания капельной влаги сепарационные устройства цилиндрической формы Ø 2200 мм, с установленными внутри на входе цилиндров лопастными завихрителями, а на выходе – специальными влагоотбойными козырьками.

5. *Экранированные газоходы очищаемого и очищенного газа* – система магистральных трубопроводов тандема установок мокрой газоочистки, оборудованная датчиками расхода очищенного газа, автоматизированными регулирующими дроссельными задвижками и автоматически регулируемые запорными клапанами, управление приводом которых непосредственно связано с пультом управления металлургического агрегата.

6. *Эксгаустеры* – тягодутьевые установки (дымососы), обеспечивающие транспортировку по магистральным газоходам газоотводящих трактов потоков очищаемого и очищенного газов.

При первоначальной запыленности дымовых газов $q_1 = 60 \text{ г/м}^3$ и требуемой запыленности после газоочистки $q_2 \leq 0,1 \text{ г/м}^3$ в пересчете на сухой газ, требуемая эффективность пылеулавливания η для (ЭРТУМГ) составит:

$$\eta = (q_1 - q_2) / q_1 = 0,998 \cdot 100 = 99,8 \%. \quad (1)$$

Основные технические характеристики (ЭРТУМГ) приведены в табл. 1.

Расход газа, поступающего на блок труб Вентури (ЭРТУМГ) от 1-го конвертора $V_r = (90000 - 145000) \text{ м}^3/\text{ч}$ (в зависимости от режима работы конвертера активный / пассивный), расход воды $V_b = (70 - 130) \text{ м}^3/\text{ч}$ (также в зависимости от режима работы конвертера), тогда удельный расход воды на один блок труб Вентури (ЭРТУМГ) соответственно составит:

$$m = V_b / V_r = (0,77 - 0,9) \text{ литр/м}^3. \quad (2)$$

Таблица 1

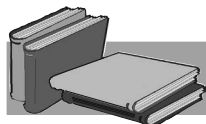
1. Расход кислорода на продувку кислородных конвертеров № 1, № 2, № 3	170/220 нм ³ /мин
2 Расход технической воды на охлаждение трехэлементных кессонов конвертеров (на каждый элемент № 1, № 2, № 3)	450–500 м ³ /час
3. Расход оборотной воды на скруббер	до 560 м ³ /час
4. Расход оборотной воды на блок труб Вентури	до 130 м ³ /час
5. Объемы конвертерных газов, транспортируемых эксгаустером 3500-15-1	от 130 до 160 тыс. м ³ /час
6. Температура конвертерных газов на выходе из кислородных конвертеров № 1, № 2, № 3	1700 °С
7. Температура дымовых газов на выходе из скруббера	75-90 °С
8. Температура воды, поступающей на элементы кессона	8–26 °С
9. Температура оборотной воды, поступающей на скруббер и трубы-распылители Вентури	34–36 °С
10. Давление воды, поступающей на охлаждение	(0,3–0,4) мПа
11. Разрежение перед эксгаустером 3500-15-1	10,2 кПа
12. Запыленность конвертерных газов до очистки	60 г/м ³
13. Запыленность конвертерных газов после их процесса мокрой газоочистки в пересчете на сухой газ	0,1 г/м ³

Таблица 2

1. Производительность по условиям всасывания	150000 м ³ /час
2. Повышение давления (разница между абсолютным статическим конечным и начальным давлением)	1000 мм вод. ст.
3. Температура газа при входе во всасывающий патрубок	не более + 70 °С
4. Число оборотов колеса эксгаустера	1500 об/мин
5. Мощность электродвигателя эксгаустера	1300 кВт

Технические характеристики эксгаустеров ЭРТУМГ указаны в табл. 2.

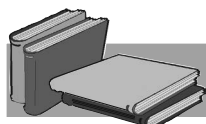
Температура газов перед эксгаустером более + 70 °С недопустима, так как при этом резко падает напорная характеристика, и данный нагнетатель в этом случае не сможет развить необходимый напор 10,2 кПа.



ЛИТЕРАТУРА

1. Юдашкин М.Я. Пылеулавливание и очистка газов в черной металлургии. – М.: Металлургия, 1984. – 320 с.
2. Бережинский А.И., Циммерман А.Ф. Охлаждение и очистка газов кислородных конвертеров. – М.: Металлургия, 1975. – 192 с.
3. Бережинский А.И., Хомутинников П.С. Утилизация, охлаждение и очистка конвертерных газов. – М.: Металлургия, 1970. – 216 с.
4. Сталинский Д.В., Швец М.Н. Опыт УкрГНТЦ «ЭНЕРГОСТАЛЬ» по очистке технологических и аспирационных газов в металлургических производствах // «Пылегазоочистка». – 2012. – № 3. – С. 10–14.
5. Швец М.Н., Трембач Т.Ф., Сталинский Д.В., Пирогов А.Ю. Применение рукавных фильтров для очистки аспирационных выбросов коксохимического производства // *Экология и промышленность*. – 2006. – № 2. – С. 8–11.
6. Швец М.Н. Улавливание и очистка технологических газов и неорганизованных выбросов электросталеплавильных печей // *Экология и здоровье человека. Охрана водного и воздушного бассейнов. Утилизация отходов: сборник научных статей XI Международной научно-технической конференции: Т.2*. – Харьков: «Курсор», 2003. – С. 170–176.
7. Русанов А.А., Урбах И.И., Анастасиади А.П. Очистка дымовых газов в промэнергетике. – М.: «Энергия», 1969. – 459 с.
8. А. с. СССР № 935532, С 21 С 5/38. Способ отвода конверторных газов и система для его осуществления / Р.Ф. Грач, Ю.Д. Григорьян, Р.М. Грызлин, Г.М. Каненко, А.М. Поживанов, Е.А. Семененко, А.И. Толочко, И.В. Франценюк, А.А. Угаров, М.М. Черепинский, А.Ф. Циммерман; № 2971656/22-02; заяв. 13.08.1980, опубл. 15.06.1982, Бюл. № 22.
9. Патент на корисну модель № 89309 Україна, МПК С 21 С 5/38. Комплекс установок газоочистки / Сталинський Д.В., Мантула В.Д., Дунаєв О.В., Лавошник О.С., Виниарз Я., Котинський Д.О.; заявник і власник Державне підприємство УкрНТЦМП «Енергосталь». – № у 2013 14559; заявл. 12.12.2013; опубл. 10.04.2014, Бюл. № 7.

Поступила 25.01.2019



REFERENCES

1. Yudashkin, M. Ya. (1984). Dust collection and gas cleaning in ferrous metallurgy. Moscow: Metallurgiya, 320 p. [in Russian].
2. Berezhinsky, A.I., Tsimmerman, A.F. (1975). Cooling and cleaning of oxygen converter gases. Moscow: Metallurgiya, 192 p. [in Russian].
3. Berezhinsky, A.I., Khomutinnikov, P.S. (1970). Disposal, cooling and cleaning of converter gases. Moscow: Metallurgiya, 216 p. [in Russian].
4. Stalinsky, D.V., Shvets, M.N. (2012). The experience of UkrGNTTS "ENERGOSTAL" for the purification of process and aspiration gases in metallurgical industries. "Pylegazoochistka", no. 3, pp. 10–14 [in Russian].
5. Shvets, M.N., Trembach, T.F., Stalinsky, D.V., Pirogov, A. Yu. (2006). Application of bag filters for cleaning aspiration emissions of coke-chemical production. *Ecology and industry*, no. 2, pp. 8–11 [in Russian].
6. Shvets, M.N. (2003). Capture and purification of process gases and fugitive emissions of electric furnaces. *Ecology and human health. Protection of water and air pools. Waste management: a collection of scientific articles of the XI International Scientific and Technical Conference: Vol. 2*. Kharkov: "Cursor", pp. 170–176 [in Russian].
7. Rusanov, A.A., Urbakh, I.I., Anastasiadi, A.P. (1969). Purification of flue gases in industrial energy. Moscow: "Energy", 459 p. [in Russian].
8. Grach, R.F., Grigor'ian, Yu.D., Gryzlin, R.M., Kanenko, G.M., Pozhivanov, A.M., Semenenko, E.A., Tolochko, A.I., Frantseniuk, I.V., Ugarov, A.A., Cherepinsky, M.M., Tsimmerman, A.F. (1982). The method of removal of the converter gases and the system for its implementation. USSR author's certificate no. 935532, C 21 C 5/38. no. 2971656 / 22-02; announced 13.08.1980, published 15.06.1982, Bull. no. 22 [in Russian].
9. Stalinsky, D.V., Mantula, V.D., Dunaev, O.V., Lavoshnik, O.S., Viniarz, J., Kotinsky, D.O. (2014). Gas purification complex. Patent for utility model no. 89309 Ukraine, MPK C 21 C 5/38; applicant and governor State Enterprise UkrNTTSMP "Energostal", no. u 2013 14559; decl. 12.12.2013; publ. 10.04.2014, Bull. no. 7 [in Ukrainian].

Received 25.01.2019

Анотація

С.М. Сергєєв, директор з охорони праці, промислової безпеки та екології, e-mail: Sergey.Sergeev@dch.com.ua

ТОВ «Development Construction Holding» (DCH), Київ, Україна

Новий високоефективний енергозберігаючий комплекс газоочисного устаткування для проведення регульованого очищення викидів від машин і агрегатів металургійних виробництв. Повідомлення 1

Розглянуто конструкцію комплексу газоочисного устаткування, що дозволяє в умовах металургійних виробництв справляти активний неоднорідно-вибірковий вплив на оброблюване середовище – технологічні газові викиди, що відводяться від металургійних плавильних агрегатів, для зменшення використання енергоресурсів (електроенергії, води) у процесі очистки технологічних викидів та капітальних витрат. Основні складові вузли розробленої конструкції даного комплексу представлено у вигляді енергоємного регульованого тандему установок мокрої газоочистки (ЕРТУМГ), сформованих тотожними структурними вузлами і елементами, газовідвідні тракти яких з'єднані колекторним газоходом, забезпеченим автоматично регульованим запірним клапаном. В колекторах подачі оборотної води в апарат мокрої газоочистки, на входи в скруббер і блок труб Вентурі (ЕРТУМГ) встановлено датчики витрати води і автоматизовані регульовані дросельні засувки, управління приводом яких пов'язане з пультом управління металургійного агрегату, що забезпечує безпосередній прямозалежний зв'язок параметрів роботи газоочистки з фазою технологічного циклу, в якому знаходиться даний металургійний агрегат. У газоходах очищеного газу газовідвідних трактів (ЕРТУМГ) встановлено датчики витрати очищеного газу і автоматично регульовані запірні клапани, управління приводом яких також пов'язане з пультом управління металургійного агрегату, для забезпечення прямозалежного зв'язку параметрів роботи газоочистки від фази технологічного циклу металургійного агрегату. Розроблений комплекс газоочисного устаткування призначений для експлуатації в умовах киснево-конвертерних цехів металургійних підприємств і враховує специфіку та режими роботи існуючого технологічного обладнання: ємність, продуктивність і технологічні режими роботи встановлених конвертерів.

Ключові слова

Установка мокрої газоочистки, продуктивність, енергозбереження, пилогазовий викид, скруббер, ексгаустер, розрідження, датчик витрати води, автоматизована дросельна засувка, запірний клапан.

Summary

S.N. Sergeev, Director of Health, Safety and Environmental,
e-mail: Sergey.Sergeev@dch.com.ua

LLC “Development Construction Holding” (DCH), Kyiv, Ukraine

New highly efficient energy-saving gas-cleaning equipment for the regulated cleaning of emissions from machines and units of metallurgical production. Report 1

The design of the gas-cleaning equipment complex is considered, which makes it possible to produce an active non-uniform-selective effect on the environment being processed – blast furnace gas from converters and converters, under the conditions of the blast furnace and steelmaking redistribution, to reduce energy consumption (electricity, water) in the process of cleaning emissions and capital costs. The main components of the designed structure of this complex are presented in the form of energy-intensive adjustable tandem wet gas cleaning installations (ERTUMG), formed by identical structural nodes and elements, the gas exhaust paths of which are connected by a collector duct equipped with an automatically controlled shut-off valve. In the collectors of the circulating water supply to the wet gas cleaning apparatus, at the entrances to the scrubber and the Venturi tube unit (ERTUMG), water flow sensors and automated adjustable throttle valves are installed, the drive control of which is connected to the control panel of the metallurgical unit, which provides a direct, direct dependence of the parameters of the gas cleaning operation with the phase of the technological cycle in which the metallurgical unit is located. In the flue gas ducts of the gas exhaust ducts (ERTUMG), flow sensors of the cleaned gas and automatically controlled shut-off valves are installed, the drive control of which is also connected to the control panel of the metallurgical unit, to ensure a direct dependence of the parameters of the gas cleaning operation on the phase of the technological cycle metallurgical unit. The developed complex of gas-cleaning equipment is intended for operation in the conditions of oxygen-converting shops of metallurgical enterprises and takes into account the specifics and modes of operation of the existing process equipment: capacity, performance and technological modes of operation of installed converters.

Keywords

Installation of wet gas cleaning, performance, energy saving, dust and gas emission, scrubber, exhauster, vacuum, water flow sensor, automated throttle valve, shut-off valve.

Конференции в 2019 году

Конференція молодих вчених та спеціалістів «СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ МАШИНО-БУДУВАННЯ» (присвячена 120-річчю з дня народження академіка НАН України Філіппова Анатолія Петровича)	15.04 2019
м. Харків, Україна, Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України E-mail: igbaranov.84@gmail.com	
XII Міжнародна конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ НА ОСНОВІ НОВІТНІХ ФІЗИКО-МАТЕРІАЛОЗНАВЧИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА КОМП'ЮТЕРНОГО КОНСТРУВАННЯ МАТЕРІАЛІВ»	18 – 19.04 2019
м. Київ, Україна, КПІ ім. Ігоря Сікорського, Інженерно-фізичний факультет, кафедра фізики металів E-mail: conference.kpm@meta.ua	
XVII Всеукраїнська науково-практична конференція «СПЕЦІАЛЬНА МЕТАЛУРГІЯ: ВЧОРА, СЬОГОДНІ, ЗАВТРА»	23.04 2019
м. Київ, Україна, КПІ ім. Ігоря Сікорського Website: http://smytt-metal.kpi.ua/SMYTT-17	
Конференція «ФУНКЦІОНАЛЬНІ МАТЕРІАЛИ ДЛЯ ІННОВАЦІЙНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ – ФМІЕ-2019» (присвячена 70-річчю від дня народження академіка НАН України Анатолія Петровича Шпака)	13 – 15.05 2019
м. Київ, Україна, Інститут металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України Website: https://www.fmie.space/ E-mail: fmie_2019@imp.kiev.ua	
Всеукраїнська конференція з міжнародною участю «ХІМІЯ, ФІЗИКА ТА ТЕХНОЛОГІЯ ПОВЕРХНІ» і семінар «СИНТЕЗ ТА ЗАСТОСУВАННЯ БІОСУМІСНИХ НАНОСИСТЕМ НА ОСНОВІ МЕТАЛІВ»	15 – 17.05 2019
м. Київ, Україна, Інститут хімії поверхні ім. О.О. Чуйка E-mail: icvmtt34@gmail.com	
Міжнародна науково-практична конференція «ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ»	20 – 25.05 2019
м. Івано-Франківськ – Яремче, Україна Website: http://itcm.comp-sc.if.ua E-mail: yurii.iliash@pu.if.ua	
VII Міжнародна конференція «КОСМІЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ: СУЧАСНЕ ТА МАЙБУТНЄ» (присвячується 65-річчю з дня заснування Державного підприємства «Конструкторське бюро «Південне»)	21 – 24.05 2019
м. Дніпро, Україна, ДП «КБ «Південне» Website: https://dpukrconfiaa.org/ E-mail: info@dpukrconfiaa.org	

XV Міжнародна науково-практична конференція «ЛИТВО. МЕТАЛУРГІЯ. 2019» м. Запоріжжя, Україна, Виставковий центр «Козак-палац» E-mail: kaf.stal@metal.nmetau.edu.ua ; berlizeva.tatyana@gmail.com	21 – 23.05 2019
XI Міжнародна науково-технічна конференція «НОВІ МАТЕРІАЛИ І ТЕХНОЛОГІЇ В МАШИНОБУДУВАННІ-2019» м. Київ, Україна, КПІ ім. Ігоря Сікорського, Інженерно-фізичний факультет, ауд. 203-9 Website: http://metacasting.kpi.ua/2019 E-mail: metacasting@ukr.net	30 – 31.05 2019
Международная конференция «МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ СВАРКИ, НАПЛАВКИ, НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ И 3-D ТЕХНОЛОГИЙ» г. Киев, Украина, Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины Website: http://www.pwi-scientists.com/rus/welding-consumables_2019 E-mail: journal@paton.kiev.ua ; romanova@paton.kiev.ua	4 – 5.06 2019
V Международный научный конгресс «ИННОВАЦИИ 2019» г. Варна, Болгария Website: http://www.innova-eng.eu E-mail: office@innova-eng.eu	19 – 22.06 2019
IV Международная научная конференция “Industry 4.0” г. Бургас, Болгария Website: http://www.industry-4.eu E-mail: office@industry-4.eu	24 – 27.06 2019
IX Международная конференция «ЛУЧЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В СВАРКЕ И ОБРАБОТКЕ МАТЕРИАЛОВ» г. Одесса, Украина, отель «Аркадия» Website: http://pwi-scientists.com/rus/ltwmp2019 E-mail: journal@paton.kiev.ua ; romanova@paton.kiev.ua ; patonpublishinghouse@gmail.com	9 – 13.09 2019
VII Міжнародна науково-технічна конференція «ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ, МАТЕРІАЛИ І ОБЛАДНАННЯ У ЛИВАРНОМУ ВИРОБНИЦТВІ» м. Краматорськ, Україна Website: http://www.dgma.donetsk.ua/tolpkonf-2019.html	23 – 27.09 2019
II International Conference of Casting and Materials Engineering ICCME 2019 “Materials and Technologies for Automotive Industry” Krakow, Poland, Faculty of Foundry Engineering Website: www.foundry.agh.edu.pl/iccme-2019/ E-mail: konferencjawo@agh.edu.pl	15.11 2019

ЗМІСТ

Бочка В.В., Сова А.В., Двоєглазова А.В.	
Покращення якості агломерату шляхом удосконалення способу підготовки шихти.	3
Гришин О.М., Надточій А.А., Петренко В.О.	
Фізико-хімічний аналіз комплексного відновлення Cr_2FeO_4 за участю метану.	11
Писарський С.М., Смірнов О.М.	
Дослідження сучасних уявлень про природу формування відкладень в вогнетривах при розливанні сталі. Повідомлення 1.	21
Дорошенко В.С.	
Концепція роторно-конвеєрного комплексу для лиття за моделями, що газифікуються, та термообробки виливків.	31
Лук'яненко І.В.	
Дослідження процесів диференціації структури чавунних виливків методом комп'ютерного моделювання.	41
Ясюков В.В., Лисенко Т.В., Воронова О.І., Солоненко Л.І.	
Аналіз способів підвищення ефективності ливарного виробництва.	47
Цуркін В.М.	
Системні підходи до вирішення проблеми забезпечення якості у ливарному виробництві.	56
Василев Я.Д., Замогильний Р.О., Гринкевич В.О.	
Вплив технологічних параметрів процесу холодної штабової прокатки на продуктивність двохкільтових реверсивних станів.	64
Ясєв О.Г.	
Моделювання очищення поверхонь потоком абразивних часток.	72
Сергєєв С.М.	
Новий високоефективний енергозберігаючий комплекс газоочисного устаткування для проведення регульованого очищення викидів від машин і агрегатів металургійних виробництв. Повідомлення 1.	77
Конференції у 2019 році.	84

CONTENTS

Bochka V.V., Sova A.V., Dvoeglazova A.V.

Improvement of the quality of agglomerate by improving the method of charge preparation. 3

Grishin A.M., Nadtochij A.A., Petrenko V.A.

Physical and chemical analysis of complex restoration of Cr_2FeO_4 with participation of methane. 11

Pisarskii S.N., Smirnov A.N.

The study of modern concepts about the nature of deposits in refractories during casting of steel. Report 1. . . 21

Doroshenko V.S.

The concept of a rotor-conveyor complex for Lost Foam Casting process and heat treatment of metal castings. 31

Lukianenko I.V.

Study of processes of structure differentiation of cast-iron castings by computer simulation. 41

Yasiukov V.V., Lysenko T.V., Voronova O.I., Solonenko L.I.

Analysis of ways to improve the efficiency of foundry. 47

Tsurkin V.M.

Systems approaches to solving the problem of quality assurance in foundry. 56

Vasilev Ya.D., Zamogilny R.A., Grinkevich V.A.

Influence of technological parameters of the cold stripping process on the productivity of two-stand reversible mills. 64

Yasev A.G.

Modeling of cleaning surfaces by the stream of abrasive particles. 72

Sergeev S.N.

New highly efficient energy-saving gas-cleaning equipment for the regulated cleaning of emissions from machines and units of metallurgical production. Report 1. 77

Conferences in 2019. 84

адреса редакції та друкарні.....

Україна, 03142, м. Київ, бул. Вернадського, 34/1
Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України
Телефон: (044) 424-04-10, факс (044) 424-35-15, e-mail: mlu@ptima.kiev.ua
Інформація про журнал на сайті: www.ptima.kiev.ua
Надруковано ТОВ «Про формат», вул. Маршала Жукова, 45 Б.