

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

№9-10'2018
(304-305)

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 Национальной академии наук Украины

Ассоциация литейщиков Украины

Украинская ассоциация сталеплавильщиков

- **Назюта Л.Ю., Тарасюк Л.И.**
- Металлургическое образование. Проблемы и решения. 3
- **Ярошевский С.Л., Кочура В.В., Кузнецов А.М., Шульга И.В., Хайбулаев А.С.,**
- **Афанасьева З.К.**
- Эффективность и ресурсы пылеугольной технологии выплавки чугуна. 7
- **Сигарев Е.Н., Недбайло Н.Н., Кащеев М.А., Байдуж Ю.В.**
- Совершенствование конструкции гарнисажной фурмы и технологии восстановления профиля
рабочего пространства конвертера. 23
- **Губенко С.И., Парусов Э.В., Парусов О.В., Чуйко И.Н.**
- Особенности влияния неметаллических включений на механические свойства и малоцикловую
долговечность стальных канатов при эксплуатации в агрессивных средах. 31
- **Ковальчук А.Г., Ямшинский М.М., Федоров Г.Е.**
- Физико-химические процессы в отливках при износостойком легировании поверхности. 38
- **Лихошева В.П., Шатрава А.П., Пеликан О.А.**
- Современные способы производства биметаллических изделий. 46
- **Лысенко Т.В., Тур М.П., Крейцер К.А., Козишкурт Е.Н.**
- Усовершенствование оборудования и технологии литья под давлением для получения
тонкостенных отливок. 54
- **Воронова О.И.**
- Технологическое решение изготовления формообразующей оснастки по керамическим
армированным стержням 60
- **Иванова Л.Х.**
- Утилизация отходов в литейном производстве. 65
- **Kyung-Hyun Kim, Sim Hyum Suk, Цуркин В.Н., Иванов А.В., Зайченко А.Д.,**
- **Жданов А.А., Честных Н.В.**
- Влияние энергетической обработки расплава на механические свойства алюминиевого
сплава В95пч. 68

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 08.11.2018. Подписано в печать 27.12.2018. Формат 60x84/8. Бумага офсетная № 1. Печать на ризографе.
Уч.-изд. л. – 10,08. Усл.-печ. л. – 8,72. Усл. кр.-от. – 9,64. Тираж – 150. Отпечатано ООО «Про формат», ул. Маршала Жукова, 45 Б.

Л.Ю. Назюта, д-р техн. наук, профессор, e-mail: nazuta_l_u@pstu.edu

Л.И. Тарасюк, канд. техн. наук, доцент

ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, Украина

Металлургическое образование. Проблемы и решения

Рассмотрены проблемы профессиональной подготовки металлургов в условиях юга Украины. Показано, что, несмотря на высокую долю металлопродукции мариупольских металлургических комбинатов (около 35 % от валового продукта и 23 % от внешнего экспорта страны), в Украине уделяется незначительное внимание подготовке специалистов в этой области. Рассмотрены причины резкого сокращения набора студентов на металлургические специальности. Предложены варианты сотрудничества с потенциальными инвесторами – благотворительными фондами и корпорацией Метинвест.

Ключевые слова: металлургия, образование, абитуриент, студент, специалист.

Введение. Мариуполь – один из ведущих металлургических центров Украины. В 2017 г. в Украине выплавлено 21,3 млн тонн стали, из них – 7,3 млн тонн (34,8 %) на металлургических комбинатах Мариуполя ЧАО ММК и ЧАО «МК «Азовсталь» группы «Метинвест». В этом году доля металлургии в общем экспорте составила 8,3 млрд долларов (23 % от общего экспорта страны), из них около 40 % экспорта продукции обеспечили комбинаты Мариуполя.

В современных условиях экономической нестабильности и падения производства комбинаты «Азовсталь» и им. Ильича одни из немногих предприятий, рентабельно работающих, даже в период вражеской агрессии, и наращивающих выпуск продукции, пользующейся спросом в Украине, в СНГ и в странах дальнего зарубежья.

В связи с этим профессия металлургов и, прежде всего в области доменного и сталеплавильного производства, на протяжении многих лет являлась одной из престижных, которая характеризовалась устойчивым спросом на выпускников с оплатой труда выше, чем в других отраслях промышленности.

Сущность проблемы. Современное металлургическое производство представляет собой сложную производственную систему, управление которой требует высокой квалификации специалистов, обширных специальных и общенаучных знаний, приобретаемых студентами.

Основная доля научно-технических работников этих предприятий – выпускники ГВУЗ «ПГТУ» – одного из старейших технических вузов Украины. Подготовка инженеров-металлургов осуществляется на металлургическом факультете. Его выпускники работают практически на всех металлургических предприятиях Украины и других стран. За 85 лет существования факультета было подготовлено более 13500 высококвалифицированных специалистов. На факультете ведущей является кафедра «Металлургия черных металлов». Первый выпуск инженеров состоялся в 1933 г.

К настоящему времени кафедрой было подготовлено свыше 4000 инженеров-сталеплавильщиков, в том числе 128 докторов и кандидатов наук, которые

плодотворно работают на предприятиях Украины, Российской Федерации, в странах ближнего зарубежья, а также в Польше, Федеративной Республике Германии, Китае, Пакистане, Ливане, Египте, Нигерии, Эфиопии, странах Латинской Америки, Мексике и других государствах.

Еще недавно выпускники кафедры получали достаточно высокую профессиональную подготовку, что позволяло им выбирать место производственной деятельности и давало возможности для повышения квалификации в аспирантуре.

Вместе с тем по ряду причин, среди которых основными являются демографическая ситуация в регионах, где сосредоточены основные металлургические активы, а также экономические трудности в отраслях промышленного производства в результате военных действий и оккупации территорий с сырьевыми ресурсами, набор студентов на металлургические специальности резко сократился.

Нарушены экономические стимулы, побуждающие молодых людей посвятить себя работе в этой отрасли. В результате этого, в отрасли сложилась критическая ситуация с подготовкой квалифицированных специалистов – металлургов. Набор студентов постоянно сокращается. В 2005 г. на 1-й курс металлургического факультета поступило 197 студентов по специальностям «Металлургия стали», «Металлургия чугуна», «Прокатка» и «Термообработка». В 2017 г. факультет набрал 39 студентов (из них 3 контрактника). При этом набор студентов гуманитарного факультета и филологов, был значительно выше (рисунок).

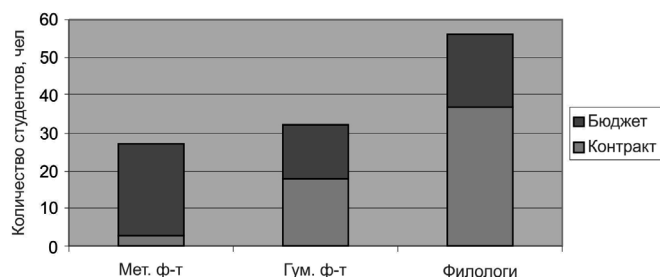
Аналогичная ситуация с набором студентов-металлургов сложилась и в других высших учебных заведениях. В таблице представлена динамика набора студентов ГВУЗ «ПГТУ» и его доля в общем объеме госзаказа. Как следует из представленных данных, за пять лет набор студентов по металлургическим специальностям, в целом по Украине и ГВУЗ «ПГТУ» в частности, сократился почти в три раза.

В 2017 г. введен двухступенчатый институт подготовки бакалавров и магистров. В связи с постоянным недобором абитуриентов, металлургический

Динамика набора студентов металлургов

Шифр и название специальности (направления)		Год приема					
		2013	2014	2015	2016	2017	2018
6.050401	Металлургия	411	359	216	–	–	–
6.050402	Литейное производство	163	177	86	–	–	–
136	Металлургия	–	–	–	168	155	–
Общеукраинские объемы госзаказа		574	536	302	168	155	–
Количество ВУЗов		14	13	13	12	10	–
ГВУЗ «ПГТУ»							
6.050401	Металлургия	72	70	32	–	–	–
6.050402	Литейное производство	17	15	5	–	–	–
136	Металлургия	–	–	–	36	27	20

Сравнительный анализ набора студентов в 2017 г.



Сравнительный анализ набора студентов ГВУЗ «ПГТУ» в 2017 г.

факультет вынужден объединять группы, а также унифицировать обучение при подготовке студентов ранее отдельных специальностей, вносить изменения в планы обучения, отказываясь от ранее разработанных дисциплин. При этом, если при подготовке бакалавров это не привело к резкому ухудшению качества образования, то при подготовке магистров (специалистов в узких направлениях науки и производства) это коренным образом нарушило систему и качество их подготовки.

Критическая ситуация сложилась с подготовкой кадров для высшей школы. Средний возраст преподавателей металлургического факультета – предпенсионный. Если они откажутся работать в таких условиях, на место преподавателей высшей категории практически не найдется достойных кандидатов. Для подготовки профессорско-преподавательского состава требуются десятилетия. Вместе с тем в аспирантуре по металлургическим специальностям (несмотря на относительно высокую стипендию – 4000 грн) практически нет аспирантов. В 2011 г. обучалось 7, в последние годы – 1-3 аспиранта. Ранее защитившиеся ученые, как правило, устраиваются на фирмы с достойными зарплатами, примеров тому много.

В связи с уменьшением количества студентов и объединением групп были сокращены нагрузки на преподавателей практически на всех кафедрах металлургического факультета. Это привело к тому, что найти молодых ученых на должности старших преподавателей и доцентов в перспективе практически невозможно. С учетом существующих ставок и тарифов средняя зарплата преподавателей практически не отличается от оплаты вспомогательного персонала университета. На металлургическом факультете в настоящее время работают 40 преподавателей, на

которых выделено 16 ставок, в среднем – 0,4 ставки на 1 преподавателя.

С проблемой подготовки высококвалифицированных кадров профессорско-преподавательского состава Министерство образования самостоятельно не справится. Проблема резкого снижения поступления на технические специальности касается не только нашего университета, не только Украины. Международный фонд *Alcoa* на протяжении многих лет помогает университетам, дополнительно стимулируя студентов и преподавателей технических ВУЗов, например, России. В сентябре этого года был заключен договор между владельцами Харьковского тракторного завода и ХПИ об инвестициях в обучение студентов технических специальностей.

Решение проблем. Общеизвестен благотворительный образовательный фонд Б. Колесникова по направлению «Образование и наука». Он проводит открытые конкурсы среди студенческой молодежи и молодых специалистов с целью выявления наиболее умных и профессиональных кандидатов. В результате конкурсного отбора победители получают целевые гранты на обучение и дальнейшее развитие.

Если металлурги хотят получить квалифицированных специалистов, необходимы комплексные усилия, в том числе значительные инвестиции в процесс подготовки преподавательского состава. Обратимся к истории. Ранее, подготовка аспирантов, как правило, проводилась в рамках НИР с обязательным использованием оригинального лабораторного оборудования ВУЗов или НИИ. Аспиранты имели возможность исследовать существующие технологии производства, а затем моделировать новые в лабораторных условиях. В настоящее время в ВУЗах нет нового современного оборудования, а имеющееся морально и технически устарело. При анализе качества подготовки магистров следует отметить трудности, связанные с отсутствием информации о существующих технологических процессах в отраслях.

Кафедра металлургии стали, которая в настоящее время входит в состав объединенной кафедры «Металлургия черных металлов», имеет опыт подготовки специалистов вне рамок учебных программ. Таганрогский металлургический завод, при реконструкции мартеновского цеха и ввода в эксплуатацию электродуговой печи (ЭДП), мини-металлургический завод ИСТИЛ в период освоения комплекса внепечного

рафинирования заключали прямые договоры с ПГТУ на проведение производственной практики и дополнительные курсы по оригинальным методикам. Ранее металлургические предприятия Мариуполя заключали договоры (спецзаказ) на обучение студентов, родители которых работали на этих предприятиях.

Следует выбрать такой способ инвестиций, который повысит квалификацию как студента, так и преподавателя. Этим может стать НИР по заказам предприятий, в которых для решения актуальных проблем должны привлекаться не менее 50 % студентов и магистров. Это будет адаптировать будущих специалистов к условиям рынка.

Для выработки рабочих программ следует создавать творческие коллективы из представителей ВУЗов, АН Украины и группы Метинвеста.

Учитывая многолетний опыт металлургического факультета ПГТУ в подготовке специалистов, наличие оригинальных программ дисциплин, которые разрабатывались наиболее известными учеными страны, а также близость к основным металлургиче-

ским предприятиям группы Метинвеста, следует признать ПГТУ ведущим в данной программе.

Выводы и рекомендации. Одним из инвестиционных проектов может стать целенаправленная подготовка специалистов для высшего звена профессорско-преподавательского состава.

Металлургические предприятия должны и могут делегировать наиболее талантливых специалистов для обучения в аспирантуре и докторантуре, сохраняя средний заработок на период их обучения. А также предоставлять необходимые информационные материалы, касающиеся существующих технологий. Мы готовы к сотрудничеству и заранее благодарим Вас за участие в подготовке будущих специалистов.

Следует отметить, что специалисты в области черной металлургии необходимы не только в г. Мариуполе, но и на других предприятиях Украины. Специалисты с большим опытом работы и высокой квалификацией могут направляться в длительные командировки для работы в странах дальнего зарубежья.

Поступила 24.09.2018

Анотація

Л.Ю. Назюта, д-р техн. наук, професор, e-mail: nazuta_l_u@pstu.edu
Л.І. Тарасюк, канд. техн. наук, доцент

ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет»,
м. Маріуполь, Україна

Металургійна освіта. Проблеми і рішення

Розглянуто проблеми професійної підготовки металургів в умовах півдня України. Показано, що, незважаючи на високу частку металопродукції маріупольських металургійних комбінатів (близько 35 % від валового продукту і 23 % від зовнішнього експорту країни), в Україні приділяється незначна увага підготовці фахівців в цій області. Розглянуто причини різкого скорочення набору студентів на металургійні спеціальності. Запропоновано варіанти співпраці з потенційними інвесторами – благодійними фондами та корпорацією Метінвест.

Ключові слова

Металургія, освіта, абітурієнт, студент, фахівець.

Summary

L.Yu. Nazyuta, Doctor of Engineering Sciences, Professor,
e-mail: nazuta_l_u@pstu.edu; **L.I. Tarasyuk**, Candidate of Engineering
Sciences, Associate Professor

SHEI "Priazov State Technical University", Mariupol, Ukraine

Metallurgical education. Problems and solutions

Problems of professional training of metallurgists in the conditions of the south of Ukraine are considered. It is shown that, despite the high share of metal products of Mariupol metallurgical plants (about 35 % of the gross product and 23 % of the country's foreign exports), little attention is paid to training specialists in this field. The reasons for the sharp reduction in the recruitment of students for metallurgical specialties are considered. Options for cooperation with potential investors – charitable foundations and the Metinvest corporation are proposed.

Keywords

Metallurgy, education, university entrant, student, specialist.

С.Л. Ярошевский¹, д-р техн. наук, проф., проф. кафедры

В.В. Кочура¹, канд. техн. наук, доц., зав. кафедрой, e-mail: kochura@ukr.net

А.М. Кузнецов², канд. техн. наук, нач. доменного цеха

И.В. Шульга³, канд. техн. наук, доц., зав. отделом

А.С. Хайбулаев², нач. лаборатории

З.К. Афанасьева¹, ст. преподаватель

¹Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, Украина

²Енакиевский металлургический завод, г. Енакиево, Украина

³ГП «Украинский государственный научно-исследовательский углехимический институт», г. Харьков, Украина

Эффективность и ресурсы пылеугольной технологии выплавки чугуна

Рассмотрены эффективность и ресурсы пылеугольной технологии выплавки чугуна. Выполнены расчеты перспективной технологии с расходом пылеугольного топлива (ПУТ) 180 кг/т чугуна и компенсации его негативного влияния за счет подготовки кокса к плавке, использования кокса улучшенного качества, коксового орешка (до 80 кг/т чугуна), повышения температуры дутья, что позволило снизить расход кокса до 298,7 кг/т чугуна (176,9 кг/т чугуна, 37,2 % снижения от базового уровня) и повысить производительность печи на 398,2 т/сут (12,7 %).

Ключевые слова: пылеугольное топливо, чугун, кокс, природный газ, коксовый орешек, доменная печь.

Снижение расхода кокса на выплавку чугуна – основной путь повышения эффективности доменной технологии. За последние 200 лет расход твердого топлива снизился в 8–10 раз – до 250–350 кг/т чугуна, а производительности доменных печей повысились до 2,5–3,5 т/(м³·сут). Основой данной динамики является принцип полной и комплексной компенсации нарушений газодинамики, условий горения кокса, восстановления оксидов, нагрева шихты и других, вызываемых в основном снижением доли кокса в шихте и горением топлива в фурменных зонах. Устранялись указанные изменения за счет внедрения компенсирующих мероприятий, нейтрализующих негативные изменения технологии: повышение температуры дутья, снижение выхода шлака, улучшение качества железорудных материалов, кокса и пылеугольного топлива (ПУТ) [1–5].

В настоящее время все основные металлургические предприятия Украины имеют в своем составе современные пылеугольные комплексы.

По данным НПП «Металлургпром» [6], вдувание ПУТ в количестве 123,8 кг/т чугуна в 2015 г. позволило снизить расход природного газа (ПГ) на 32 м³/т чугуна, кокса – на 10–20 %, обеспечить усредненную выгоду от внедрения ПУТ 391 грн/т чугуна.

Пылеугольная технология – весьма капиталоемкое мероприятие (5–7 млн \$ на 1 млн т годовой производительности доменного цеха). В связи с этим эффективность пылеудувания появляется только по-

сле освоения 100–120 кг ПУТ/т чугуна [4]. Ситуация значительно усугубляется на Украине, использующей для замены кокса ПГ, вывод которого из состава дутья при вдувании ПУТ предопределяет повышение расхода кокса на 40–60 кг/т чугуна. Из изложенного следует, что эффективность использования ПУТ может быть значительно (возможно, вдвое) повышена.

Определенное влияние на развитие ПУТ-технологии оказал 35-летний опыт промышленной эксплуатации первой в Европе промышленной пылеугольной установки на Донецком металлургическом заводе¹ (1980–2015 гг.): технология совместного использования ПГ+ПУТ+O₂; выплавка литейного чугуна с применением ПУТ; применение топливных смесей; аэрационный принцип дозирования ПУТ; оптимизация технологического режима на основе массового статистического исследования первичных данных; расчетное и экспериментальное исследование полноты сгорания топлива в фурменной зоне; оценка полноты сгорания ПУТ в горне; исследование влияния вдувания ПУТ на степень черноты фурменной зоны и технологию плавки. Для разработки и совершенствования технологических режимов доменной плавки с вдуванием ПУТ предложен принцип полной и комплексной компенсации нарушений технологии, определяемых выводом из шихты кокса и горением ПУТ [3, 4, 7–10].

Теоретические соображения, отечественный и зарубежный промышленный опыт показывают, что

¹В работе принимали участие: Панев Г.А., Козуб А.Г., Рыженков А.Н., Терещенко В.П., Попов В.Е., Иванов С.А., Брага В.В., Красавцев И.Н., Ноздрачев В.А., мастера и газовщики доменных печей и др.

массовое внедрение ПУТ-технологии на Украине, в сочетании с эффективными компенсирующими мероприятиями, обеспечит снижение уровня расхода скипового кокса до 250–300 кг/т чугуна при одновременном повышении уровня производства и других определяющих показателей.

Решение данной задачи компенсации, как правило, может быть осуществлено за счет реализации имеющихся на производстве мероприятий и резервов, организационных мероприятий и, конечно, определенных затрат, но значительно меньших, чем стоимость пылеугольных комплексов.

I. Основные компенсирующие мероприятия, обеспечивающие повышение эффективности использования ПУТ

Ресурсы компенсации таких мероприятий, как повышение температуры дутья, содержание в нем кислорода, повышение давления газа на колошнике, снижение выхода шлака и расхода сырого флюса и других в значительной мере использованы. Однако имеются такие компенсирующие мероприятия, как улучшение качества кокса, подготовка кокса к доменной плавке, компенсирующие ресурсы которых весьма значительные и в большей мере еще не использованы. На их основе возможно эффективное повышение расхода ПУТ до 150–200 кг/т чугуна.

1.1. Улучшение качества скипового кокса

Многолетний опыт доменной плавки показал, что современная доменная технология с вдуванием больших количеств дополнительного топлива в горн печи, в частности пылеугольного, не может быть осуществлена при использовании кокса низкого качества. При вдувании ПУТ в горн доменной печи роль кокса как разрыхлителя существенно возросла в связи со снижением его доли в шихте с 50–55 до 35 % и ниже. Сказанное убедительно подтверждается зарубежным опытом. За рубежом в последние годы освоена ПУТ-технология с вдуванием на 1 т чугуна 150–260 кг ПУТ, снижением на 30–50 % расхода кокса (250–300 кг/т чугуна), что в решающей степени обеспечено значительным повышением качества кокса: горячая прочность (CSR) – 60–74 %, реакционная способность (CRI) – 17–30 % (табл. 3) [11–13].

Очевидно, что массовое промышленное внедрение ПУТ-технологии однозначно должно сочетаться с мероприятиями по улучшению качества кокса.

Улучшение качества кокса – определяющий компенсирующий фактор при освоении малококсовой доменной технологии.

В доменных цехах Украины расход кокса на 1 т чугуна выше на 20–30 %, чем в европейских странах, что объясняется как менее благоприятными шихтово-технологическими условиями, так и его низким качеством (табл. 1).

Последнее характеризуется специфическими причинами:

- преобладанием в структуре геологических запасов и добыче малометаморфизированных углей с высоким выходом летучих веществ и низким показателем отражения витринита, что характеризует их более низкую способность к спеканию [14];

- повышенным индексом основности минеральной части большинства углей Донбасса: 0,25–0,35 против 0,12–0,15, необходимых для получения кокса с высоким показателем послереакционной прочности (CRS = 60–70 %) [14];

- повышенными зольностью, сернистостью шихты;
- менее совершенной технологией обработки кокса и подготовки его к доменной плавке.

Установлена четкая зависимость между показателем прочности кокса (CSR) и расходом ПУТ (рис. 1) [15].

На основании требований к свойствам кокса улучшенного качества была теоретически обоснована и сформулирована концепция производства высококачественного кокса, включающая в себя следующие основные направления [16]:

- а) формирование рациональной сырьевой базы коксования:

- обеспечение требуемых свойств угольной шихты, прежде всего, по зольности, сернистости, степени метаморфизма;

- повышение глубины обогащения и уменьшение зольности угольных концентратов;

- повышение степени однородности угольных шихт по стадиям метаморфизма;

- уменьшение количества концентратов, используемых для составления шихты на каждом предприятии;

- увеличение добычи малосернистых углей с благоприятным химическим составом минеральной части;

- б) рациональная технология коксования:

- направленное влияние на физико-химические процессы термической деструкции и синтеза для получения кокса с наибольшей долей участков анизотропной структуры (повышение степени упорядочения углерода кокса);

- снижение скоростей коксования до уровня не более 27 мм/ч;

- корректировка температурного режима при изменении условий коксования;

- в) послепечная обработка кокса:

- обеспечение стабильной влажности;

- рациональный уровень механических нагрузок на кокс при его сортировке и дополнительная механическая обработка кокса для реализации имеющихся центров механических нагрузок и трещинообразования.

Эта концепция стала основой для проведения дальнейших работ по улучшению качества кокса. Было предложено несколько вариантов составов угольных шихт для производства кокса улучшенного качества «Премиум». Как основной компонент (70–75 % в шихте) использовали угольный концентрат шахты «Красноармейская-Западная № 1» с низкой сернистостью и оптимальным индексом основности золы, обусловленным преобладанием в минеральной части угля алюмосиликатов и низким содержанием оксидов железа [16]. В качестве марки «Ж» использовали, в первую очередь, уголь шахты им. Скочинского (7–10 %). Однако в связи с ограниченностью его ресурсов недостающее количество угля восполняли концентратом шахты им. Засядько, который при участии его в шихте в количестве 15–20 % позволяет обеспечить требуемую спекаемость шихты и сохра-

Таблица 1

Свойства кокса и угольных шихт

Показатель	Значение	
	Украина	Ведущие мировые производители
Кокс		
Реакционная способность CRI, %	35–40	17,7–30
Горячая прочность CSR, %	45–50	60–74
Механическая прочность в микум-барабане, %:		
M_{25}	87–89	–
M_{10}	6–8	< 7
Зольность сухой массы A^d , %	< 12	< 11
Сернистость общая сухой массы S^d , %	< 1,5	< 1
Выход летучих веществ из сухой обеззоленной массы V^{daf} , %	< 1	< 1
Угольная шихта		
Зольность сухой массы A^d , %	8,5–9,0	< 8,5
Сернистость общая сухой массы S^d , %	1,5–2,5	< 1,0
Выход летучих веществ из сухой обеззоленной массы V^{daf} , %	29–32	< 27
Толщина пластического слоя u , мм	14–18	14–16
Основность (основно-кислотное отношение) золы	0,25–0,35	< 0,16
Средний произвольный показатель отражения витринита R^o , %	< 1,0	> 1,2
Показатель неоднородности шихты по стадиям метаморфизма витринита σ_R , %	0,25–0,35	< 0,15

Таблица 2

Свойства шихты и ее компонентов для получения кокса «Премиум»

Концентрат угля шахты	Содержание, %	W^e , %	A^d , %	S^d , %	V^{daf} , %	u , мм
им. Скочинского («Ж»)	10	11,2	6,2	0,88	32,0	17
им. Засядько («Ж»)	15	11,0	8,5	2,20	32,0	26
«Красноармейская-Западная № 1» («К»)	75	8,0	7,8	0,62	29,0	13
Шихта	100	8,8	7,7	0,88	29,8	15



Рис. 1. Зависимость удельного расхода ПУТ от горячей прочности кокса: точки – экспериментальные значения по данным работы [15]

нить ее сернистость и индекс основности на приемлемом уровне.

Свойства шихты и ее компонентов приведены в табл. 2.

В 2006 г. на ЗАО «Макеевкокс» и ОАО «Ясиновский КХЗ» на основе использования указанных мало-сернистых углей, освоено производство кокса улучшенного качества «Премиум», на который разработаны и утверждены технические условия [14, 17].

Сводные данные о результатах опытно-промышленных доменных плавов на коксе улучшенного качества, проведенных за период с 2005 г., приведены в табл. 3.

Качество кокса «Премиум» улучшилось: содержание серы – (0,2–0,48 %), фракция 10–0 мм – (0,2–0,9 %), горячая прочность CSR + (5,1–18,5 %), реакционная способность CRI – (8,6–13,6 %).

Во всех доменных плавках было достигнуто существенное снижение расхода кокса (кг/т чугуна) и повышение производительности доменных печей (т чугуна/сутки): № 5 ПАО «МК «Азовсталь» (–31 и +277); № 5 ПАО «Запорожсталь» (–32 и +46); № 5 ПАО «ЕМЗ» (–21 и +153). Наилучшие результаты были получены на доменной печи № 2 ПрАО «Донецксталь» – металлургический завод (ДМЗ), работавшей с применением ПУТ (167–172 кг/т чугуна): снижение расхода кокса составило 51 кг/т чугуна (11,6 %), повышение производительности – 343 т/сут (17,1 %).

Очевидно, что значительное повышение качества кокса по горячей прочности и реакционной способности, фракционному составу и др. является обязательным и необходимым элементом для реализации технологии с расходом топлива до 200–250 кг/т чугуна и соответственным повышением эффективности его применения.

1.2. Оптимизация фракционного состава скипового кокса

Кокс металлургический неоднороден по фракционному составу, что нежелательно с точки зрения поддержания его постоянных и оптимальных значений: фракционного состава, однородности, физических и химических свойств и т. д.

Из табл. 4, видно, что горячая прочность кокса различных производителей изменяется в зависимости

Таблица 3

Результаты опытно-промышленных плавов на коксе «Премиум»

Период проведения исследований	Октябрь 2005 г.	Март–май 2006 г.	Апрель–май 2008 г.	Май–июнь 2008 г.
Доменная печь	№ 5 ПАО «МК «Азовсталь»	№ 2 ПрАО «ДМЗ»	№ 5 ПАО «Запорожсталь»	№ 5 ПАО «ЕМЗ»
Объем доменной печи, м ³	1513	1033	1513	1513
Изменения качества кокса в опытном периоде, %:				
A^d	-0,6	-0,6	+0,1	-0,1
S^d	-0,20	-0,25	-0,03	-0,48
M_{25}	+0,3	+1,7	+0,8	+0,6
M_{10}	-0,9	-0,7	-0,2	-0,8
> 80 мм	+1,5	-4,1	-0,4	+0,4
CRI	-13,6	-13,0	-8,6	-12,0
CSR	+17,6	+12,8	+5,1	+18,5
Изменение производительности доменной печи, т чугуна/сутки	+277	+343	+46	+153
Изменение расхода кокса, кг/т чугуна	-31	-51	-32	-21

Примечание: «+» – увеличение; «-» – снижение

Таблица 4

Качество металлургического кокса в зависимости от его гранулометрического состава (по данным работ [18–20])

Показатели	Класс крупности (мм) кокса, %				
	> 80	60–80	40–60	25–40	10–25
Значение CSR, %:					
ОАО «Алтай-кокс»	56,3	57,3	57,5	58,8	–
ОАО «ММК»	57,9	58,4	59,4	60,7	56,9
ОАО «Авдеевский коксохимический завод»	45,7	52,1	57,2	59,7	–
Значение CRI, %					
ОАО «ММК»	30,3	30	29,5	29	30,7

от размера фракции кокса. Наименьшую горячую прочность (CSR) имеют крупные фракции кокса +80, 60–80 мм, а наибольшую – фракция 25–40 мм.

Из сказанного следует, что существенное повышение горячей прочности кокса может быть достигнуто, прежде всего, за счет снижения содержания крупных фракций, что в значительной мере подтверждено отечественной и зарубежной практикой [18–20].

Сложнее обстоит дело с коксом мелких фракций (менее 40 мм), поскольку он связан с существенным ухудшением газопроницаемости шихты. Выходом из ситуации является высев из общей массы металлургического кокса мелких фракций (40–0 мм) и смешивание их с железорудной шихтой. Данная технология активно изучалась и разрабатывалась с середины 60-х годов прошлого столетия [21–23].

1.2.1. Использование кокса мелких фракций (40–0 мм)

Сопротивление движению газового потока или потерю напора газа в печи, можно оценить уравнением Дарси–Вейсбаха [24]:

$$\Delta P = f \cdot \frac{H \cdot (1 - \varepsilon_{\text{пр}})}{d_{\text{ч}} \cdot \varepsilon_{\text{пр}}^3} \cdot \frac{w^2 \cdot \rho}{2}, \quad (1)$$

где f – коэффициент сопротивления; H – высота слоя, м; $\varepsilon_{\text{пр}}$ – порозность, доли единиц; ρ – действительная плотность газа, кг/м³; w – действительная скорость газа (на все сечение печи), м/с; $d_{\text{ч}}$ – эквивалентный диаметр частиц, м.

Из рис. 2 [25] видно, что доля коксового орешка (КО) фракции 5–15 мм оказывает минимальное влияние на повышение газопроницаемости рудной линзы по сравнению с более крупными фракциями. Максимальная эффективность введения КО отмечена для фракций от 10–20 до 30–40 мм.

Эффективность введения в состав железорудной шихты крупных фракций КО аналогична введению скипового кокса.

Особенно значительно влияние введения первых 30 % КО (по отношению к расходу кокса), определяющих улучшение газопроницаемости рудной линзы

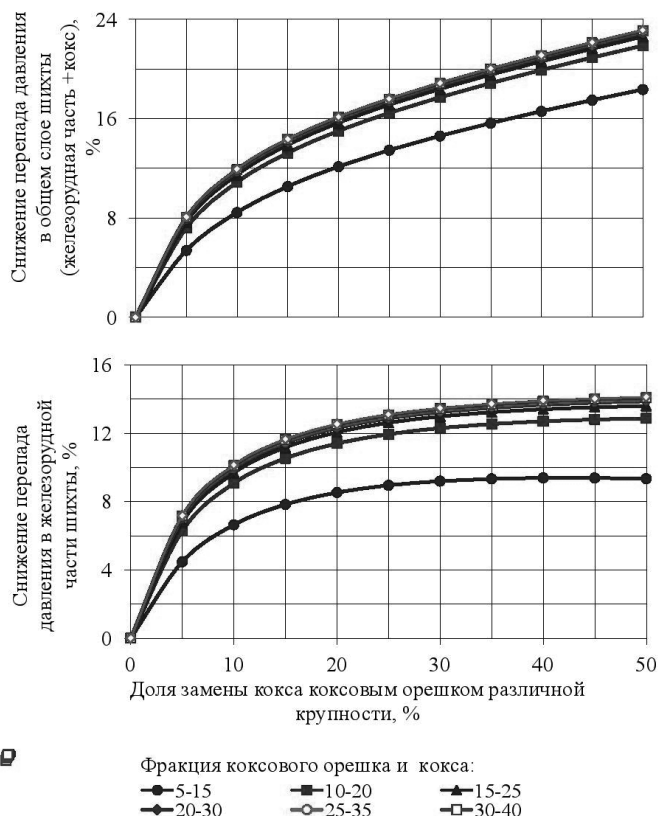


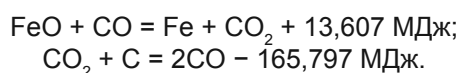
Рис. 2. Снижение перепада давления газа в слое шихты в верхней части доменной печи при введении КО крупностью в пределах от 5 до 40 мм и кокса в ее железорудную часть

шихты на 12,5–13,5 % (4–6 % прироста производительности печи). Увеличение доли КО свыше 30 % практически не оказывает влияния на газопроницаемость рудной линзы. Газопроницаемость в общем слое шихты при этом повышается при максимальной замене кокса орешком за счет снижения сопротивления в коксовом слое шихты.

Однако улучшение газопроницаемости шихты далеко не единственное преимущество введения КО в смеси с железорудной шихтой.

Преимуществами являются также:

- повышение выхода скипового кокса и КО на 2–3 %;
- повышение среднего размера скипового кокса и однородности его фракционного и химического составов;
- снижение содержания мелочи 10–0 мм в скиповом коксе;
- значительное увеличение удельной поверхности КО по сравнению с коксом, примерное равенство фракционных составов орешка и железорудной части шихты, тесный контакт между ними качественно улучшают взаимодействие оксидов железа и углерода КО по реакциям:



Лабораторные исследования показали, что увеличение расхода КО в смеси с окатышами позволяет существенно интенсифицировать процесс восстановления оксидов железа [26].

Качественная интенсификация процесса прямого восстановления за счет коксовой мелочи по указанным реакциям предопределяет ограничение данного процесса с коксом в шахте печи, что может способствовать сохранению базовых физических свойств кокса при поступлении его в фурменные зоны.

1.2.2. Отечественный и зарубежный промышленный опыт подготовки кокса к плавке

В связи с бурным развитием пылевудуния, КО в смеси с железорудной шихтой стали систематически применять с целью сохранения оптимального газодинамического режима и высокого уровня производства.

Статистическая обработка среднегодовых данных работы доменных печей Европы показывает, что при введении в шихту 530 % КО (от расхода кокса), коэффициент замены кокса орешком был близок к 1, производительность печи в основном сохранилась на высоком исходном уровне (рис. 3) [25]. Для европейских стран общепринятой практикой стало ис-

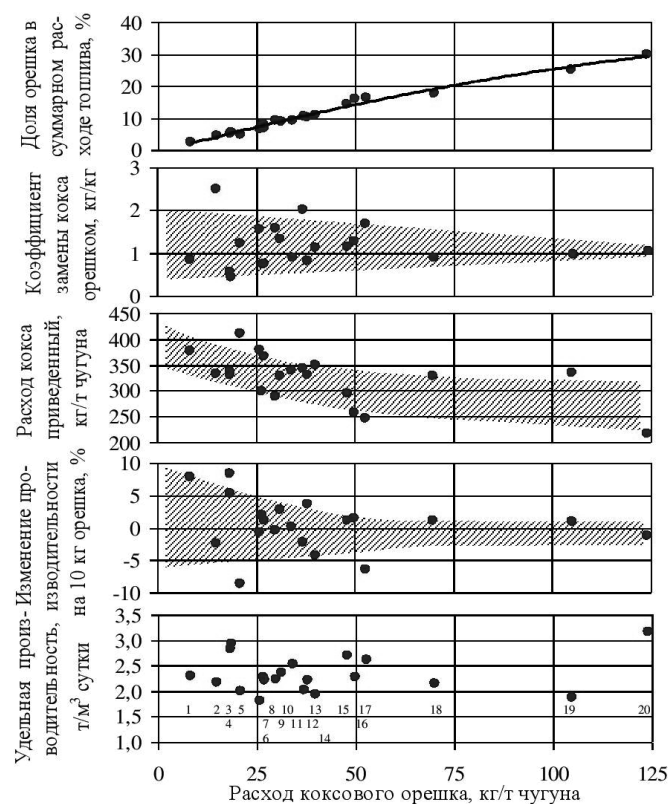


Рис. 3. Зависимость основных показателей доменной плавки от расхода коксового орешка (среднегодовые данные 1994–1996 гг.)

1 – Германия, Thyssen, Schwelgern, ДП 1; 2 – Германия, Stahlwerke, Bremen, ДП 2; 3 – Италия, ILVA, Taranto, ДП 2; 4 – Италия, ILVA, Taranto, ДП 5; 5 – Бельгия, Cockerill, Sambre, ДП Marcinelle 4; 6 – Германия, ЕКО, Eisenhüttenstadt, ДП 2; 7 – Франция, SOLLAC, FOS, ДП BF1(1995); 8 – Бельгия, Cockerill, Sambre, Ougree B; 9 – Франция, SOLLAC, FOS, ДП BF1(1996); 10 – Германия, Thyssen, Schwelgern, ДП 2; 11 – Германия, Thyssen, Hamborn, ДП 4; 12 – Германия, Preussag, Salzgitter, ДП B(1995); 13 – Франция, SOLLAC, Dunkerque, ДП 2; 14 – Германия, Preussag, Salzgitter, ДП B(1996); 15 – Германия, Thyssen, Hamborn, ДП 9; 16 – Германия, НКМ, Huckingen, ДП А; 17 – Германия, НКМ, Huckingen, ДП В; 18 – Германия, Preussag, Salzgitter, ДП А; 19 – Австрия, VA, Linz, ДП А; 20 – Финляндия, Fundia AB, ДП Koverhar.

пользование КО фракции 10–40 мм в количестве от 20 до 100 кг/т чугуна.

В доменном цехе ЧАО «ЕМЗ» в декабре 2005 – январе 2006 г. введен в эксплуатацию склад окатышей и кокса (СОК) [27]. В состав СОК входят: разгрузочное устройство, непосредственно склад окатышей и кокса, узел сортировки материалов, участок погрузки отсева окатышей, система конвейеров для транспортировки окатышей и кокса.

Через СОК предусмотрена конвейерная подача металлургического кокса к доменным печам. При подаче в одну нитку через этот склад (вагон – приемные бункера – склад – вибрационный грохот – валковая дробилка – бункера кокса доменных печей) кокс подвергается дополнительным ударно-истирающим нагрузкам по сравнению с подачей его по обычной схеме. При такой схеме кокс конвейером подается на вибрационный грохот, где из него отделяется крупная фракция (в зависимости от размера ячеек сита крупность фракции можно изменить от 60 до 90 мм), и эта фракция подается в валковую дробилку. Раздробленный кокс после дробилки и кокс-провал с виброгрохота объединяют в один поток и общим конвейером поочередно подают в бункера кокса доменных печей. Из стабилизированного кокса (по указанной новой схеме) отсев коксовой мелочи, как и при обычной схеме подачи кокса в доменные печи, производится в одну стадию на каждой доменной печи на вибрационных грохотах кокса перед его загрузкой в скипы. Мощность коксовой линии на СОК – 2–3 тыс. т кокса в сутки.

С использованием оборудования СОК:

- освоена и внедрена технология доменной плавки с введением в смеси с железорудной шихтой 30–40 кг/т чугуна КО (фракции 15–42 мм). Отсев кокса менее 15 мм используется для агломерации или направляется в штабель для приготовления ПУТ;

- разработана и внедрена в промышленных условиях технология получения скипового кокса фракции 80–42 и 70–42 мм с предварительным высевом и дроблением крупных фракций;

- расчеты показывают, что использование КО в количестве 25–40 кг/т чугуна обеспечивает снижение расхода металлургического кокса на 10,7–21,2 кг/т чугуна (1,8–3,5 %), в том числе за счет совершенствования технологии – 4–6 кг/т чугуна и 6,7–15,2 кг/т чугуна – за счет увеличения выхода из металлургического кокса КО и скипового кокса [28–30];

- для получения качественного КО использовали двухъярусные грохота с резиновыми ситами (размер просеивающих квадратных отверстий на нижнем сите 15–16 мм), что позволило снизить содержание мелочи 10–0 мм в орешке до 2 %;

- загрузка КО осуществляется из отдельного шихтового бункера последним компонентом в скип с окатышами по системе загрузки АОККК↓ 1,5 м. Объемная доля КО в смеси с железорудной шихтой составляла 5–8 %;

- освоена и внедрена технология отсева мелочи 5–0 мм из окатышей до уровня 3 % и ниже.

Ресурсы подготовки кокса к плавке весьма значительны, и на Украине они используются ограниченно: теоретические исследования и зарубежный промышленный

опыт показывают, что оптимальный расход КО в шихту составляет до 30–50 % от расхода кокса (20–100 кг/т чугуна) [25]. Данная технология является высокоэффективным обязательным элементом современной ПУТ-технологии.

II. Эффективность компенсации и перспективы ПУТ-технологии с повышенным расходом ПУТ

2.1. Методика расчета показателей доменной плавки и оптимизация технологии

Метод расчета показателей доменной плавки разработан на основе работ профессора Ленинградского политехнического института А.Н. Рамма [31].

Сущность метода заключается в определении расхода кокса по тепловым эквивалентам шихтовых материалов и дутьевым параметрам: температуре, влажности, содержанию дополнительного кислорода и расходам различных углеводородсодержащих добавок, вдуваемых в фурму доменной печи.

Для характеристики теплового режима горна приняты полученное из уравнения теплового баланса для нижней зоны теплообмена уравнение необходимой теоретической температуры горения (индекс «0» для исходных, индекс «1» для новых технологических условий) [3]:

$$t_1 = t_n + \left(1 - 0,7 \cdot \frac{r_{d_0} - r_{d_1}}{r_{d_0}} \right) \cdot \frac{K_0}{K_1} \cdot \frac{V_0}{V_1} \cdot (t_0 - t_n), \quad (2)$$

где t_0 и t_1 – необходимая теоретическая температура горения, при которой обеспечивается сохранение базовой температуры продуктов плавки, °C; t_n – температура в зоне замедленного теплообмена, °C; r_{d_0} и r_{d_1} – степень прямого восстановления, в долях единицы; V_0 и V_1 – выход горновых газов, м³/т кокса; K_0 и K_1 – расход кокса, кг/т чугуна.

Для характеристики газодинамического режима использовали уравнение [31]:

$$P_1 = P_0 \cdot \frac{V_{r0}}{V_{r1}} \cdot \left(\frac{\gamma_0 \cdot \Theta_0 \cdot d_0}{\gamma_1 \cdot \Theta_1 \cdot d_1} \right)^{0,5}, \quad (3)$$

где P_1 и P_0 – производительность доменной печи, %; V_{r0} и V_{r1} – выход газов, м³/т чугуна; Θ_0 и Θ_1 – средняя температура газов, °K; γ_0 и γ_1 – средняя плотность газов, кг/м³; d_0 и d_1 – показатель газопроницаемости шихты, %.

Для характеристики изменения восстановительных процессов при введении дополнительных топлив использовали уравнение Б.И. Китаева [32]:

$$D_1 = D_0 \cdot (1 - e^{-0,63\tau_k}), \quad (4)$$

где D_1 и D_0 – равновесная и фактическая степень использования восстановительной энергии газа, в долях единицы; τ_k – время контакта газов с окислами железа, с.

Время сгорания ПУТ в фурменных зонах рассчитывали по методике В.И. Бабия [33].

Для оценки эффективности компенсирующих мероприятий использовали понятие суммарного коэффициента замены (ΣK_3) кокса дополнительным топливом [4]:

$$\Sigma K_3 = \frac{\Delta Q_{\text{ккм}} + \Delta Q_{\text{кдт}}}{\Delta Q_{\text{дт}}},$$

где $\Delta Q_{\text{ккм}}$ и $\Delta Q_{\text{кдт}}$ – экономия кокса за счет компенсирующих мероприятий и повышения расхода дополнительного топлива, кг; $\Delta Q_{\text{дт}}$ – прирост расхода дополнительного топлива, кг.

С целью повышения достоверности расчета и оценки возможности реализации перспективных технологических режимов были обработаны годовые показатели работы зарубежных и отечественных доменных печей за длительный период времени (более 1000 опытов), и на основании выполненных статистических исследований предложены определяющие параметры, превышение определенного уровня которых маловероятно в реальных сложившихся условиях. Показано, что при достигнутых уровнях качества кокса, железорудного сырья, параметрах температурно-дутьевого режима, в диапазоне расхода кокса от 250 до 600 кг/т чугуна предельными значениями определяющих показателей являются: скорость газа в распаре – 20 м/с, выход горнового газа – 4,5 тыс. м³/т кокса, количество мелочи 5–0 мм в железорудной шихте – 400 кг/т кокса, выход шлака – 1100 кг/т кокса [4].

Указанные значения определяющих параметров рассматривались авторами статьи как граничные, предельные, разделяющие области реально достижимых и маловероятных режимов доменной плавки.

Таким образом, по описанной методике принципиально возможно корректное обоснование технологических режимов с применением ПУТ и топливных смесей в количестве до 300 кг/т чугуна при снижении расхода кокса до 100–150 кг/т чугуна.

Для выполнения указанных расчетов используются персональные компьютеры, а также программы, написанные в базе данных Microsoft Access.

В связи с применением ПУТ и снижением расхода кокса возрастает напряженность и снижается устойчивость технологических режимов. Вследствие этого авторы статьи считают целесообразным внедрение указанной методики при проектировании технологических режимов для новых доменных печей, обосновании оптимальных технологических режимов при изменении шихтовых и других технологических условий, использование дополнительных видов топлива, внедрение элементов данной методики в практику эксплуатации доменных печей.

2.2. Эффективность и перспективы использования ПУТ для выплавки чугуна

Технология доменной плавки с применением ПУТ освоена на Енакиевском металлургическом заводе (ЕМЗ) в 2016 г. [34]. Исследования по оптимизации ПУТ-технологии в основном проведены на доменной печи № 3 (ДП-3): $V_n = 1719 \text{ м}^3$, построена в 2011 г., 24 воздушные фурмы, температура дутья 1250 °С (воз-

духонагреватели Калугина), лотковое загрузочное устройство.

Пылеугольный комплекс введен в эксплуатацию по контракту с фирмой Kuttner в 2016 г. Пылеугольное топливо в печь начали дуть в апреле 2016 г. при одновременном прекращении подачи ПГ. Для приготовления ПУТ использовали кузнецкий слабоспекающийся уголь марки «СС» (зола 7 %, сера 0,2 %).

Показатели работы доменной печи в базовом и опытных с вдуванием ПУТ периодах приведены в табл. 5.

В качестве компенсирующих факторов использовали вывод из состава дутья ПГ (58,3 м³/т чугуна, что эквивалентно перерасходу кокса на 46,2 кг/т чугуна), повышение температуры дутья и содержания в нем кислорода, введение в смеси с железорудной шихтой КО фракции 15–40 мм, агломерат ЮГОК улучшенного качества, снижение основности шлака, отсев мелочи (5–0 мм) из окатышей СевГОК и другое.

Вдувание ПУТ в первом и втором опытных периодах (131,3 и 138,6 кг/т чугуна) позволило снизить расход кокса на 41,2 кг/т чугуна (8,66 %) и 77,6 кг/т чугуна (16,3 %), повысить производительность печи на 33,9 т/сут (1,06 %) и 370,06 т/сут (10,53 %). Коэффициент замены кокса ПУТ (без учета и с учетом компенсирующих мероприятий) составил соответственно 0,01 и 0,31 в первом периоде и 0,27 и 0,56 – во втором периоде. Расход условного топлива при вдувании ПУТ составил соответственно 606 и 577 кг/т чугуна в первом и втором опытных периодах.

Расчетные данные теплового баланса в основном подтверждают преимущества ПУТ-технологии. В приходе тепла замена теплоты горения кокса теплотой горения ПУТ составила 7,09 и 7,53 % (табл. 6).

Общий расход тепла повысился в первом опытном периоде – 89,8 ккал/кг чугуна (3,35 %) и снизился во втором опытном периоде – 16,2 ккал/кг чугуна (0,6 %) (табл. 6).

Период с повышенным расходом ПУТ 180 кг/т чугуна (табл. 5, 2б) рассчитан на основе результатов второго опытного периода работы ДП-3 с вдуванием ПУТ.

Компенсация негативного влияния ПУТ на технологию усилена за счет повышения температуры дутья до 1150 °С, повышения содержания кислорода в дутье (+ 3,2 %), изменения состава железорудной шихты в основном за счет введения агломерата ЮГОК, увеличения расхода КО (до 80 кг/т чугуна), улучшения качества кокса за счет использования кокса улучшенного качества, загрузки скипового кокса однородного фракционного состава (40–70 мм).

Реализация указанного режима (2б) позволила снизить расход кокса до 298,7 кг/т чугуна (на 176,9 кг/т чугуна, 37,2 %), коэффициент замены кокса ПУТ без учета и с учетом компенсирующих мероприятий составил соответственно 0,98 и 1,21 кг/кг. По сравнению с базовым периодом расход условного топлива снизился на 16,1 кг/т чугуна (2,76 %), производительность печи повысилась на 398,2 т/сут (12,7 %).

Приведенные данные свидетельствуют о высокой эффективности использования ПУТ, сопоставимой с современными европейскими образцами. О корректности и эффективности использования ПУТ в режи-

Расчет эффективности вдувания ПУТ для условий ДП-3 ЕМЗ

Наименование	Периоды			Режим 5.10– 15.11.2016 с дополнительной компенсацией (2а)	Вдувание ПУТ, кг/т чугуна (2б)
	16.03– 21.04.2016 (базовый)	10–31.07.2016 (1-й опытный)	5.10– 15.11.2016 (2-й опытный)		
Производительность, т чугуна/ сут	3142,7	3176,6	3512,8	3607,6	3540,9
Кокс сухой скиповой, кг/т чугуна	475,6	434,4	398,0	380,4	298,7
Коксовый орешек, кг/т чугуна	34,0	34,5	34,2	34,2	80,0
Сумма кокса и коксового орешка, кг/т чугуна	509,6	469,9	432,2	414,6	378,7
Агломерат ЕМЗ, кг/т чугуна	769,8	373,9	814	654	654
Агломерат ЮГОК, кг/т чугуна	0	456,9	324	450	450
Окатыши СевГОК, кг/т чугуна	904,7	801,4	521	550	550
Известняк обычный, кг/т чугуна	35,8	43,4	24	14	12
Расход сухого дутья, м ³ /т чугуна	1460	1499	1261	1207	1216
Температура дутья, °С	1100	1100	1100	1150	1150
ПУТ, кг/т чугуна	0	131,3	138,6	138,6	180,0
ПГ	58,3	0	0	0	0
Содержание кислорода в дутье, %	22,76	23,35	25,2	25,2	25,2
Выход сухого колошникового газа, м ³ /т чугуна	1947	2033	1810	1741	1759
Температура колошникового газа, °С	235	235	288	281	293
Степень использования СО, доли	0,3503	0,4451	0,434	0,447	0,438
Степень прямого восстановления, %	30,76	35,04	27,7	27,9	25,9
Выход горновых газов, м ³ /т чугуна	1859	1875	1716	1631	1671
Выход восстановительных газов, м ³ /т чугуна	781,14	777,17	761	726	759
Выход шлака, кг/т чугуна	428	385	400	389	387
Приход серы с шихтой, кг/т чугуна	6,07	6,04	5,3	5,1	4,9
Основность CaO/SiO ₂	1,09	1,09	1,05	1,00	1,00
Основность (CaO+MgO)/SiO ₂	1,28	1,20	1,18	1,12	1,12
[S]	0,074	0,081	0,082	0,098	0,095
Теоретическая температура горения, °С	2120	2207	2226	2254	2183
Расход условного топлива, кг/т чугуна	582	606	577,05	559,36	565,92
Изменение себестоимости чугуна с выпуска, грн/т	–	–	0,00	12,26	-8,95
Вынос колошниковой пыли, кг/т чугуна	36	25,8	23,9	23,9	23,9

ме с дополнительной компенсацией свидетельствуют повышение теоретической температуры горения до 2183 °С (+ 63 °С), степени использования газа (η_{CO}) на 9 %, снижение выхода горновых газов на 188 м³/т

чугуна (- 10,1 %) и степени прямого восстановления оксида железа (r_d) на 4,86 % до 43,8 %.

На основании массовой статистической обработки показателей работы доменных печей мира пред-

Тепловые балансы работы ДП-3 ЕМЗ

Статьи прихода и расхода тепла	Периоды					
	16.03–21.04.2016 (базовый)		10–31.07.2016 (1-й опытный)		5.10–15.11.2016 (2-й опытный)	
ПРИХОД ТЕПЛА						
	ккал/кг чугуна	%	ккал/кг чугуна	%	ккал/кг чугуна	%
Теплота горения кокса у фурм	739,1	27,57	634,3	22,89	592,9	22,25
Теплота горения ПУТ	0,0	0,00	196,4	7,09	200,6	7,53
Теплота горения природного газа	24,4	0,91	0,0	0,00	0,0	0,00
Теплосодержание ПУТ	0,0	0,00	2,4	0,09	2,6	0,10
Теплосодержание дутья за вычетом теплоты разложения влаги дутья	470,4	17,55	503,2	18,16	431,6	16,20
Всего в области горения	1233,9	46,02	1336,3	48,23	1227,7	46,07
Теплота окисления С в СО в процессах прямого восстановления	174,9	6,52	179,7	6,49	156,9	5,89
Окисление СО в СО ₂	1003,6	37,43	1137,8	41,06	1060,6	39,80
Окисление Н ₂ в Н ₂ О	268,7	10,02	117,1	4,23	219,7	8,24
Всего в области восстановления	1447,2	53,98	1434,6	51,77	1437,2	53,93
Общий приход тепла	2681,1	100	2770,9	100	2664,9	100,0
РАСХОД ТЕПЛА						
Диссоциация оксидов	1721,8	64,22	1688,5	60,94	1678,9	63,00
Диссоциация сернистых соединений	1,2	0,04	1,2	0,04	1,0	0,04
Диссоциация карбонатов за вычетом теплоты шлакообразования	9,4	0,35	11,4	0,41	6,2	0,23
Испарение влаги	10,6	0,40	13,4	0,48	10,5	0,39
Теплосодержание чугуна	300,0	11,19	300,0	10,83	300,0	11,26
Теплосодержание шлака	171,1	6,38	153,9	5,55	159,9	6,00
Полезный расход тепла	2214,1	82,58	2168,4	78,26	2156,5	80,92
Нагрев водяных паров до температуры колошника	10,9	0,41	6,3	0,23	11,4	0,43
Теплосодержание сухого колошникового газа	153,3	5,72	161,0	5,81	176,7	6,63
Потери тепла в окружающее пространство и с охлаждающей водой (по разности)	302,8	11,29	435,2	15,7	320,3	12,02
Общие потери тепла	467,0	17,42	602,5	21,74	508,4	19,08
Общий расход тепла	2681,1	100,0	2770,9	100,00	2664,9	100,00

ложено понятие так называемых определяющих показателей, характеризующих предельно допустимый уровень отдельных технологических показателей в зависимости от расхода кокса и технологических условий [3, 4]. Указанные показатели рассчитаны для режима 2б с повышенным расходом ПУТ (табл. 7).

Согласно расчету, все определяющие показатели соответствуют нормам (расчетные режима 2б и предельно допустимые): выход шлака, кг/т кокса (1021 и 1100), скорость газа в распаре, м/с (17,54 и 20), выход горнового газа, м³/т кокса (4412 и 4500), приход мелочи (5–0 мм) с шихтой, кг/т кокса (218 и 400). Снижение расхода кокса в расчетном периоде 2б составляет 176,9 кг/т чугуна.

Из промышленного опыта принимаем, что 50 % полученного в результате применения ПУТ снижения себестоимости чугуна составляют затраты на стоимость ПУТ, амортизацию и эксплуатацию ПУТ-установки, а 50 % – экономический эффект. Согласно данному условию, экономическая эффективность реализации ПУТ-технологии в расчетном периоде 2б

составляет 659,7 млн грн/год, что в 4,2 и 2,3 раза превышает соответственные эффекты в первом и втором опытных периодах (табл. 7).

Использованные в расчетном режиме компенсирующие мероприятия (улучшенного качества, повышение температуры дутья, подготовка кокса к плавке с использованием КО, методика расчета показателей доменной плавки и оптимизации технологии, экспериментально подтверждена полнота сгорания ПУТ в фурменных зонах свыше 99 %), опробованы и освоены в промышленных условиях [14, 16].

Для промышленного внедрения необходимо решение комплекса организационно-технических мероприятий по реализации технологического режима 2б. При этом внедрение может быть осуществлено в течение нескольких месяцев.

Описан массовый промышленный опыт работы современных мощных доменных печей с повышенным расходом ПУТ 200–260 кг/т чугуна и заменой им до 40–50 % кокса с расходом скипового кокса 250–280 кг/т чугуна и ниже [1, 4, 5, 8–10]. Однако для

Эффективность использования ПУТ на ДП-3 ЕМЗ

	16.03– 21.04.2016 (базовый)	10– 31.07.2016 (1-й опыт- ный)	5.10– 15.11.2017 (2-й опыт- ный)	5.10–15.11.2016 расчетный с дополнитель- ной компенса- цией (2а)	5.10–15.11.2016 расчетный с дополнитель- ной компенса- цией и рас- ходом ПУТ 180 кг/т чугуна (2б)
Производство, т/сут	3142,7	3176,6	3512,8	3607,6	3540,9
Расход скипового кокса, кг/т чугуна	475,6	434,4	398,0	380,4	298,7
Расход ПУТ, кг/т		131,3	138,6	138,6	180
Изменение расхода кокса за счет компенсирующих мероприятий, кг/т чугуна:					
Расход ПГ ($K_3 = 0,8$)	–	46,6	46,6	46,6	46,6
Температура дутья	–			-7,13	-7,13
O ₂ в дутье	–	0,56	2,32	2,32	2,32
[Si]	–	-0,76	-0,76	-2,28	-2,28
Расход известняка	–	1,81	-2,81	-5,18	-5,66
Выход шлака	–	-8,18	-5,33	-7,42	-7,80
Всего за счет технологии (с 6 по 10)	–	-6,57	-6,58	-19,69	-20,55
Расход коксового орешка ($K_3 = 0,6$)	–	–	–	–	-36,8
Переход на кокс улучшенного качества	–	–	–	–	-30
Суммарная эффективность компенсирующих мероприятий (без ПГ), кг/т чугуна	–	-6,57	-6,58	-19,69	-48,15
Суммарная эффективность компенсирующих мероприятий (с ПГ), кг/т чугуна	–	38,42	40,02	26,91	-1,55
Расход кокса с учетом компенсирующих мероприятий	–	474,43	438,02	407,31	297,15
Коэффициент замены кокса ПУТ (с компенсирующими мероприятиями)	–	0,01	0,27	0,49	1,21
Коэффициент замены кокса ПУТ (без компенсирующих мероприятий)	–	0,31	0,56	0,69	0,98
Замена кокса ПУТ, кг/т чугуна (%)	–	1,17 (0,25)	37,58 (7,9)	68,29 (14,36)	217,65 (45,76)
Замена кокса ПУТ и компенсирующими мероприятиями, кг/т чугуна (%)	–	41,20 (8,66)	77,60 (16,32)	95,20 (20,02)	176,90 (37,2)
Изменение производительности, т/сут (%)	–	33,9 (1,08)	370,1 (11,77)	464,9 (14,79)	398,2 (12,7)
Определяющие показатели:					
Рудная нагрузка, т/т кокса	3,49	3,63	4,03	4,19	4,58
Выход шлака, кг/т кокса	839	821	925	938	1021
Выход горнового газа, м ³ /т кокса	3820	4335	3971	4199	4412
Приход мелочи (0–5 мм) с шихтой, кг/т кокса	241,0	264,5	193	199	218
Скорость газа в распаре, м/с	10,24	11,62	12,93	13,56	17,54

реализации данной технологии необходимы: кокс с показателем горячей прочности CSR 65–75 %, температура дутья более 1200 °С, содержание кислорода в дутье более 30 %, выход шлака до 300 кг/т чугуна и т. д., что в наших условиях потребует значительных капитальных затрат.

Реализация современной ПУТ-технологии с расходом 180 кг/т чугуна ПУТ и усилением компенсации (режим 2б) обеспечит эффект на уровне современных европейских доменных печей, однако потребует на порядок меньших капитальных затрат и времени.

Следует отметить, что современная ПУТ-технология имеет существенные недостатки: очень высокий расход энергоносителей – расход условного топлива равен 400–600 кг/т чугуна, причем в основном это кокс и высококачественные угли, весьма дорогие и дефицитные; очень большие затраты требуются для повышения температуры дутья и содержания в нем кислорода; более глубокого обогащения шихты и снижения выхода шлака и др.

В связи с этим представляется весьма актуальной технология с использованием вторичных энергоносителей, в первую очередь доменного газа, выход которого составляет от 1500 до 3000 м³/т чугуна. Существуют различные методы переработки доменного газа в восстановительные газы. В частности, перспективным и опробованным в промышленных условиях представляется способ удаления CO₂ из доменного газа водой в скрубберах высокого давления (28–30 атм) [35–37].

Авторам статьи представляется, что снизить расход дефицитных энергоносителей и условного топлива до 200 кг/т чугуна и ниже невозможно без решения проблемы вторичного использования энергоносителей. Авторы считают необходимым и целесообразным начать проведение научных исследований по решению данной задачи.

Выводы

1. На Украине с 2016 г. все основные металлургические предприятия имеют в своем составе современные пылеугольные комплексы и освоили ПУТ-технологии. Однако эффективность ПУТ-технологии качественно ниже, чем за рубежом: доля замены кокса углем составляет 15–25 % при минимальном изменении производительности печей.

2. На основании требований к свойствам кокса улучшенного качества обоснована и сформулирована концепция производства высококачественного кокса, включающая в себя следующие основные направления: формирование рациональной сырьевой базы коксования, рациональной технологии коксования и послепечной обработки кокса.

Опытно-промышленные доменные плавки на коксе улучшенного качества проведены на ПАО «МК «Азовсталь», ПрАО «ДМЗ», ПАО «Запорожсталь», ЧАО «Енакиевский МЗ». Во всех доменных плавках было достигнуто существенное снижение расхода кокса и повышение производительности доменных печей: ДП № 5 ПАО «МК «Азовсталь» (–31 кг/т чугуна и +277 т чугуна/сутки); ДП № 5 ПАО «Запорожсталь» (–32 кг/т чугуна и +46 т чугуна/сутки); ДП № 5 ЧАО «ЕМЗ» (–21 кг/т чугуна и +153 т чугуна/сутки). Наилучшие результаты были получены на ДП № 2 ПрАО «Донецксталь» – металлургический завод (ДМЗ), работавшей с применением ПУТ (167–172 кг/т чугуна): снижение расхода кокса составило 51 кг/т чугуна (11,6 %), повышение производительности – 343 т/сут (17,1 %).

3. Наименьшую горячую прочность (CSR) имеют крупные фракции кокса +80, 60–80 мм, а наибольшую – фракция 25–40 мм, поэтому в скиповом кок-

се рекомендуется ограничить фракционный состав пределами 40–70 мм.

Кокс мелких фракций отрицательно влияет на газодинамику и производительность доменной печи. Выходом из ситуации является высев из общей массы скипового кокса мелких фракций (40–0 мм), производство КО (40–15 мм) и введение его в печь в смеси с железорудной шихтой.

Введение в смеси с железорудной шихтой КО способствует: повышению выхода скипового кокса и КО на 2–3 %; повышению однородности фракционного и химического составов скипового кокса; снижению содержания мелочи 10–0 мм в скиповом коксе; загрузка в печь смеси железорудной шихты с коксовым орешком способствует интенсификации процесса прямого восстановления оксидов железа в нижней части печи, ограничивает процесс прямого восстановления скипового кокса, что способствует сохранению его базовых физических свойств при поступлении в фурменную зону.

Ресурсы подготовки кокса к плавке весьма значительны: теоретические исследования и зарубежный промышленный опыт показывают, что эффективная ПУТ-технология невозможна без соответствующей подготовки кокса к плавке и использования КО в количестве 40–100 кг/т чугуна.

4. Разработана методика расчета показателей доменной плавки на основе работ профессора Ленинградского политехнического института А.Н. Рамма, основанная на определении расхода кокса по тепловым эквивалентам шихтовых материалов и дутьевым параметрам плавки, позволяющая на основе принципа полной и комплексной компенсации и компенсирующих мероприятий рассчитывать технологические режимы доменной плавки с применением ПУТ и топливных смесей в количестве до 300 кг/т чугуна при снижении расхода кокса до 100–150 кг/т чугуна. В расчетах используется понятие «определяющие показатели плавки», превышение определенного уровня которых маловероятно в реальных сложившихся условиях: скорость газа в распаре (м/с), выход горнового газа (м³/т кокса), выход шлака (кг/т кокса).

5. Технология доменной плавки с применением ПУТ освоена на Енакиевском металлургическом заводе в 2016 г.

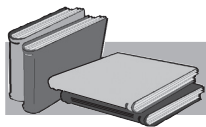
В первом и втором опытных периодах на ДП-3 вдувание ПУТ 131 и 138 кг/т чугуна позволило снизить расход кокса на 41,2 кг/т чугуна (8,7 %) и 77,6 кг/т чугуна (16,3 %), вывести природный газ 58,3 м³/т чугуна. Коэффициент замены кокса ПУТ (без учета и с учетом компенсирующих мероприятий) составил соответственно 0,01 и 0,31 в первом периоде и 0,27 и 0,56 во втором. Производительность ДП-3 повысилась при этом на 33,9 т/сут (1,1 %) и 370,06 т/сут (10,5 %).

На основе проведенных опытных плавков выполнены расчеты перспективной технологии с повышенным расходом ПУТ и усиленной компенсацией его негативного влияния за счет подготовки кокса к плавке, использования кокса улучшенного качества, КО (до 80 кг/т чугуна) повышения температуры дутья и др.

Указанные компенсирующие мероприятия и изменения технологии позволили повысить расход ПУТ

до 180 кг/т чугуна. При этом расход кокса снизился до 298,7 кг/т чугуна (176,9 кг/т чугуна, 37,2 % снижения от базового уровня), коэффициент замены кокса ПУТ без компенсирующих мероприятий составил

0,98 кг/кг, с учетом компенсирующих мероприятий – 1,21 кг/кг, а прирост производства – 398,2 т/сут (12,7 %), что соответствует средним показателям эффективности использования ПУТ в мире.

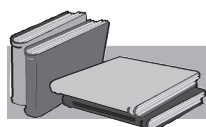


ЛИТЕРАТУРА

1. Савчук Н.А., Курунов И.Ф. Доменное производство на рубеже XXI века // *Новости черной металлургии за рубежом*. – 2000. – Часть II. – Приложение 5. – М.: ОАО «Черметинформация». – 42 с.
2. Товаровский И.Г. Доменная плавка. Эволюция, ход процессов, проблемы и перспективы. – Днепропетровск: Пороги, 2003. – 597 с.
3. Ярошевский С.Л. Выплавка чугуна с применением пылеугольного топлива. – М.: Металлургия, 1988. – 176 с.
4. Ярошевский С.Л., Афанасьева З.К., Кузин А.В. Основные принципы расчета и организации технологии доменной плавки при замене дополнительными топливами 30–60 % кокса (отечественный и зарубежный опыт) // Творческое наследие Б.И. Китаева: труды Междунар. науч.-практ. конф. 11–14 февраля 2009 г. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2009. – С. 138–148.
5. Геердес М., Токсопеус Х., Ван дер Влит К. Введение в современный доменный процесс. – Нидерланды, 2004. – 131 с.
6. Последние шаги долгого ПУТи: металлурги завершают внедрение технологии, дающей им заметную экономию. URL: http://www.ukrudprom.ua/digest/Poslednie_shagi_dolgogo_PUTi_metallurgi_zavershayut_vnedrenie_te.html (дата обращения 10.10.2018).
7. Терещенко В.П. История освоения пылеугольной технологии на Донецком металлургическом заводе: 1963–2006 гг. Труды международной научно-практической конференции «Пылеугольное топливо – альтернатива природному газу при выплавке чугуна». – Донецк: Норд компьютер, 2006. – С. 13–23.
8. Ярошевский С.Л., Емченко А.В., Попов В.Е. и др. Эффективность и перспективы замены природного газа пылеугольным топливом в доменных цехах Украины // *Металл и литье Украины*. – 2010. – № 7. – С. 13–20.
9. Ярошевский С.Л. Пылеугольное топливо – реальная и эффективная альтернатива природному газу в металлургии // *Металл и литье Украины*. – 2006. – № 3. – С. 15–20.
10. Рыженков А.Н., Ярошевский С.Л., Крикунов Б.П. и др. Технологии плавки с использованием пылеугольного топлива и природного газа на дутье, обогащенном кислородом // *Сталь*. – 2005. – № 12. – С. 13–18.
11. Курунов И.Ф. Доменное производство Китая, Японии, Северной Америки, Западной Европы и России // Труды международного конгресса доменщиков. – М.: Издательский дом «Кодекс», 2010. – С. 6–17.
12. Дышлевич И.И., Изюмский Н.Н. Доменное производство Украины: новый подход к оценке качества кокса // Сборник докладов 8-го международного семинара «Уголь в металлургии и энергетике», г. Ялта, 2002 г. – Ялта: Контраст, 2002. – С. 20–33.
13. Харахулах В.С., Захарченко В.Н. Доменное производство Украины // Труды международного конгресса доменщиков. – М.: Издательский дом «Кодекс», 2010. – С. 24–32.
14. Рыженков А.Н., Гордиенко А.И., Ковалев Е.Т. и др. Требования к качеству кокса для доменной плавки с использованием пылеугольного топлива и промышленный опыт производства такого кокса в Украине // Труды международной научно-технической конференции «Пылеугольное топливо – альтернатива природному газу при выплавке чугуна», г. Донецк, 18–21 декабря 2006 г. – Донецк: УНИТЕХ, 2006. – С. 65–76.
15. Золотухин Ю.А., Андрейчиков Н.С., Куколев Я.Б. Требования к качеству кокса для доменных печей, работающих с различным удельным расходом пылеугольного топлива // *Кокс и химия*. – 2009. – № 3. – С. 25–31.
16. Филатов Ю.В., Ковалев Е.Т., Шульга И.В. и др. Теория и практика производства и применения доменного кокса улучшенного качества: Монография. – Киев: Наукова думка, 2011. – 128 с.
17. Филатов Ю.В., Рыженков А.Н., Крикунов Б.П. и др. Влияние кокса повышенного качества на работу доменной печи с вдуванием пылеугольного топлива без природного газа // Труды международной научно-технической конференции «Пылеугольное топливо – альтернатива природному газу при выплавке чугуна». – Донецк: УНИТЕХ, 2006. – С. 248–254.
18. Венц В.А., Черемискина А.Н., Киселев Н.И. и др. Исследование зависимости параметров прочности металлургического кокса от его гранулометрического состава // *Кокс и химия*. – 2006. – № 11. – С. 12–27.
19. Сибигагуллин С.К., Харченко А.С., Теплых Е.О. и др. Прочностные характеристики коксового орешка различного происхождения // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. – 2012. – № 1. – С. 19–21.
20. Копырин И.А., Кроль В.Л., Андрианов В.Ф. Об оптимальной крупности кокса // *Металлург*. – 1967. – № 8. – С. 10–13.
21. Логинов В.И., Берин А.Л., Соломатин С.М. и др. Влияние смешивания рудного сырья с коксом на газодинамические условия и технико-экономические показатели доменной плавки // *Сталь*. – 1977. – № 5. – С. 391–394.

22. Коробов И.И., Котов К.И., Пинчук С.И. и др. О возможности использования мелкого кокса в современной доменной технологии // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 1969. – № 5. – С. 40–43.
23. Логинов В.И., Мусиенко К.А., Воронков Д.В. и др. Работа доменной печи при совместной загрузке железорудных материалов и кокса в скип // *Сталь*. – 1987. – № 12. – С. 7–12.
24. Готлиб А.Д. Доменный процесс. – М.: Металлургия, 1966. – 530 с.
25. Литвинов Л.Ф., Ярошевский С.Л., Кузнецов А.М. и др. Производство и использование коксового орешка в доменной плавке. – Донецк: Компьютер Норд, 2004. – 68 с.
26. Емченко А.В., Крикунов Б.П., Ярошевский С.Л. и др. Исследования эффективности применения коксового орешка в доменной плавке // *Металл и литье Украины*. – 2011. – № 9-10. – С. 25–30.
27. Ярошевский С.Л., Кузнецов А.М., Падалка В.П., Хлапонин Н.С., Кузин А.В. Эффективность технологии доменной плавки при использовании в шихте коксового орешка // *Сталь*. – 2006. – № 3. – С. 2–6.
28. Литвинов Л.Ф., Ярошевский С.Л., Кузнецов А.М. и др. Эффективность технологии доменной плавки при загрузке в печь коксового орешка в смеси с железорудной шихтой // *Металл и литье Украины*. – 2004. – № 12. – С. 5–9.
29. Ярошевский С.Л., Кузнецов А.М., Падалка В.П. и др. Промышленный опыт и эффективность использования коксового орешка в смеси с железорудной шихтой // *Металл и литье Украины*. – 2005. – № 6. – С. 3–6.
30. Рыженков А.Н., Савранский Л.В., Ярошевский С.Л. и др. Технология доменной плавки с вдуванием в горн пылеугольного топлива и природного газа на обогащенном кислородом дутье, обеспечивающая замену 30–40 % кокса // *Металл и литье Украины*. – 2005. – № 1-2. – С. 3–10.
31. Рамм А.Н. Современный доменный процесс. – М.: Металлургия, 1980. – 303 с.
32. Китаев Б.И., Ярошенко Ю.Г., Лазарев Б.Л. Теплообмен в доменной печи. – М.: Металлургия, 1966. – 355 с.
33. Бабий В.И., Куваев В.Ф. Горение угольной пыли и расчет пылеугольного факела. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 208 с.
34. Кузнецов А.М., Зубенко А.В., Падалка В.П. и др. Освоение и эффективность технологии доменной плавки с применением пылеугольного топлива на ЧАО «Енакиевский металлургический завод» // *Металл и литье Украины*. – 2017. – № 8-10. – С. 4–11.
35. Курунов И.Ф., Савчук Н.А. Состояние и перспективы бездоменной металлургии железа. – М.: Черметинформация, 2002. – 198 с.
36. Ноздрачев В.А., Ярошевский С.Л., Терещенко В.П. Перспективные технологии доменной плавки с применением кислорода и пылеугольного топлива. – Донецк: Новый мир, 1996. – 197 с.
37. Ситулин Н.А., Мельников Е.Я., Фурман М.С., Кричевский И.Р. Справочник азотчика. – М.: Химия, 1967. – 492 с.

Поступила 24.10.2018



REFERENCES

1. Savchuk, N.A., Kurunov, I.F. (2000). Blast furnace production at the turn of the XXI century. *Novosti chernoi metallurgii za rubezhom*. Moscow: Chermetinformatiia, 42 p. [in Russian].
2. Tovarovskij, I.G. (2003). Blast furnace smelting. Evolution, progress of processes, problems and prospects. Dnepropetrovsk: Porogi, 597 p. [in Russian].
3. Yaroshevskij, S.L. (1988). Smelting iron using pulverized coal. Moscow: Metallurgiiia, 176 p. [in Russian].
4. Yaroshevskij, S.L., Afanas'eva, Z.K., Kuzin, A.V. (2009). Basic principles of calculation and organization of blast furnace smelting technology with replacement of 30–60 % of coke by additional fuels (domestic and foreign experience). *Tvorcheskoe nasledie B.I. Kitaeva: trudy Mezhdunar. nauch.-prakt. Konf. The creative heritage of B.I. Kitaev: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference*. Ekaterinburg: UGTU-UPI, pp. 138–148 [in Russian].
5. Geerdes, M., Toksopeus, Kh., Van der Vliet, K. (2004). Modern blast furnace process. Introduction. *Niderlandy*, 131 p. [in Russian].
6. The last steps of a long way: metallurgists are completing the introduction of technology, giving them significant savings. URL: http://www.ukrudprom.ua/digest/Poslednie_shagi_dolgogo_PUTi_metalurgi_zavershayut_vnedrenie_te.html (Last accessed 10.10.2018) [in Russian].
7. Tereshchenko, V.P. (2006). The history of the development of pulverized coal technology at the Donetsk Metallurgical Plant: 1963–2006. *Trudy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Pyleugol'noe toplivo – al'ternativa prirodnomu gazu pri vyplavke chuguna"*. Proceedings of the international scientific-practical conference "Chimney fuel – an alternative to natural gas in the smelting of iron". Donetsk, Nord komp'juter, pp.13–23 [in Russian].
8. Yaroshevskij, S.L., Emchenko, A.V., Popov, V.E. et al. (2010). Efficiency and prospects for replacing natural gas with pulverized coal in blast furnaces of Ukraine. *Metall i lit'e Ukrainy*, no. 7, pp. 13–20 [in Russian].
9. Yaroshevskij, S.L. (2006). Coal fuel – a real and effective alternative to natural gas in metallurgy. *Metall i lit'e Ukrainy*, no. 3, pp. 15–20 [in Russian].

10. Ryzhenkov, A.N., Yaroshevskij, S.L., Krikunov, B.P. et al. (2005). Melting technologies using pulverized coal and natural gas on an oxygen-enriched blast. *Stal'*, no. 12, pp. 13–18 [in Russian].
11. Kurunov, I.F. (2010). The blast furnace production of China, Japan, North America, Western Europe and Russia. Trudy mezhdunarodnogo kongressa domenshchikov. Proceedings of the International Congress of ironmakers. Moscow: Izdatel'skii dom "Kodeks", pp. 6–17 [in Russian].
12. Dyshevich, I.I., Iziumskij, N.N. (2002). Ukrainian blast furnace production: a new approach to assessing the quality of coke. Sbornik dokladov 8-go mezhdunarodnogo seminar "Ugol' v metallurgii i energetike". Collection of reports of the 8th international seminar "Coal in metallurgy and power engineering", Yalta: Kontrast, pp. 20–33 [in Russian].
13. Kharahulakh, V.S., Zakharchenko, V.N. (2010). Blast production of Ukraine. Trudy mezhdunarodnogo kongressa domenshchikov. Proceedings of the International Congress of Ironmakers. Moscow: Izdatel'skii dom "Kodeks", pp. 24–32 [in Russian].
14. Ryzhenkov, A.N., Gordienko, A.I., Kovalev, E.T. et al. (2006). Requirements for the quality of coke for blast furnace smelting using pulverized coal and industrial experience in the production of such coke in Ukraine. Trudy mezhdunarodnoi nauchno-tehnicheskoi konferentsii "Pyleugol'noe toplivo – al'ternativa prirodnomu gazu pri vyplavke chuguna". Proceedings of the International Scientific and Technical Conference "Dust-free fuel is an alternative to natural gas in the smelting of iron". Donetsk: UNITEH, pp. 65–76 [in Russian].
15. Zolotukhin, Yu.A., Andreichikov, N.S., Kukolev, Ya.B. (2009). Quality requirements for coke for blast furnaces operating with different specific consumption of pulverized coal. *Koks i khimiia*, no. 3, pp. 25–31 [in Russian].
16. Filatov, Yu.V., Kovalev, E.T., Shul'ga, I.V. et al. (2011). Theory and practice of production and use of improved quality coke. Kiev: Naukova dumka, 128 p. [in Russian].
17. Filatov, Yu.V., Ryzhenkov, A.N., Krikunov, B.P. et al. (2006). Effect of coke of improved quality on the operation of a blast furnace with injection of pulverized coal without natural gas. Trudy mezhdunarodnoi nauchno-tehnicheskoi konferentsii "Pyleugol'noe toplivo – al'ternativa prirodnomu gazu pri vyplavke chuguna". Proceedings of the international scientific-technical conference "Dust-free fuel is an alternative to natural gas in the smelting of pig iron". Donetsk: UNITEH, pp. 248–254 [in Russian].
18. Vents, V.A., Cheremiskina, A.N., Kisel'ov, N.I. et al. (2006). Study of the dependence of the strength parameters of metallurgical coke on its particle size distribution. *Koks i khimiia*, no. 11, pp. 12–27 [in Russian].
19. Sibagatullin, S.K., Harchenko, A.S., Teplykh, E.O. et al. (2012). Strength characteristics of coke nut of different origin. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova. Bulletin of Magnitogorsk State Technical University G.I. Nosov*, no. 1, pp. 19–21 [in Russian].
20. Kopyrin, I.A., Krol', V.L., Andrianov, V.F. (1967). On the optimal coke size. *Metallurg*, no. 8, pp. 10–13 [in Russian].
21. Loginov, V.I., Berin, A.L., Solomatin, S.M. et al. (1977). The effect of mixing ore with coke on gas-dynamic conditions and technical and economic indicators of blast-furnace smelting. *Stal'*, no. 5, pp. 391–394 [in Russian].
22. Korobov, I.I., Kotov, K.I., Pinchuk, S.I. et al. (1969). About the possibility of using small coke in modern blast furnace technology. *Metallurgicheskaja i gornorudnaia promyshlennost'*, no. 5, pp. 40–43 [in Russian].
23. Loginov, V.I., Musienko, K.A., Voronkov, D.V. et al. (1987). The operation of a blast furnace with the joint loading of iron ore materials and coke into a skip. *Stal'*, no. 12, pp. 7–12 [in Russian].
24. Gotlib, A.D. (1966). Ironmaking. Moscow: *Metallurgija*, 530 p. [in Russian].
25. Litvinov, L.F., Yaroshevskij, S.L., Kuznetsov, A.M. et al. (2004). Production and use of coke nut in blast furnace smelting. Donetsk: Komp'iuter Nord, 68 p. [in Russian].
26. Emchenko, A.V., Krikunov, B.P., Yaroshevskij, S.L. et al. (2011). Studies of the effectiveness of the use of coke nut in blast furnace smelting. *Metall i lit'e Ukrainy*, no. 9-10, pp. 25–30 [in Russian].
27. Yaroshevskij, S.L., Kuznetsov, A.M., Padalka, V.P. et al. (2006). Efficiency of blast furnace smelting technology when using in a mixture of coke nut. *Stal'*, no. 3, pp. 2–6 [in Russian].
28. Litvinov, L.F., Yaroshevskij, S.L., Kuznetsov, A.M. et al. (2004). Efficiency of blast furnace smelting technology when loading a coke nut mixed with an iron ore charge into the furnace. *Metall i lit'e Ukrainy*, no. 12, pp. 5–9 [in Russian].
29. Yaroshevskij, S.L., Kuznetsov, A.M., Padalka, V.P. et al. (2005). Industrial experience and efficiency of using coke nut mixed with iron ore charge. *Metall i lit'e Ukrainy*, no. 6, pp. 3–6 [in Russian].
30. Ryzhenkov, A.N., Savranskij, L.V., Yaroshevskij, L.V. et al. (2005). The technology of blast-furnace smelting with injection of pulverized coal and natural gas into a forge on an oxygen-enriched blast, providing replacement of 30–40 % of coke. *Metall i lit'e Ukrainy*, no. 1–2, pp. 3–10 [in Russian].
31. Ramm, A.N. (1980). Modern domain process. Moscow: *Metallurgija*, 303 p. [in Russian].
32. Kitaev, B.I., Yaroshenko, Yu.G., Lazarev, B.L. (1966). Heat exchange in a blast furnace. Moscow: *Metallurgija*, 355 p. [in Russian].
33. Babij, V.I., Kuvaev, V.F. (1986). Combustion of coal dust and the calculation of pulverized coal torch. Moscow: Energoatomizdat, 208 p. [in Russian].
34. Kuznetsov, A.M., Zubenko, A.V., Padalka, V.P. et al. (2017). Development and efficiency of blast-smelting technology using pulverized coal at JSC "Enakievsky Metallurgical Plant". *Metall i lit'e Ukrainy*, no. 8-10, pp. 4–11 [in Russian].

35. Kurunov, I.F., Savchuk, N.A. (2002). The state and prospects of blast-furnace iron metallurgy. Moscow: Chernetinformatsiia, 198 p. [in Russian].
36. Nozdrachev, V.A., Yaroshevskij, S.L., Tereshchenko, V.P. (1996). Promising technologies for blast smelting using oxygen and pulverized coal. Donetsk: Novyi mir, 197 p. [in Russian].
37. Situlin, N.A., Mel'nikov, E.Ya., Furman, M.S., Krichevskij, I.R. (1967). Handbook of nitrogen engineer. Moscow: Khimiia, 492 p. [in Russian].

Received 24.10.2018

Анотація

С.Л. Ярошевський¹, д-р техн. наук, проф., проф. кафедри;
В.В. Кочура¹, канд. техн. наук, доц., зав. кафедри,
e-mail: kochura@ukr.net; **О.М. Кузнєцов²**, канд. техн. наук, нач.
доменного цеху; **І.В. Шульга³**, канд. техн. наук, доц., зав. відділу;
А.С. Хайбулаєв², нач. лабораторії; **З.К. Афанасьєва¹**, ст. викладач

¹Донецький національний технічний університет, м. Донецьк, Україна

²Єнакієвський металургійний завод, м. Єнакієво, Україна

³ДП «Український державний науково-дослідний вуглехімічний інститут», м. Харків, Україна

Ефективність та ресурси пиловугільної технології виплавки чавуну

Розглянуто ефективність і ресурси пиловугільної технології виплавки чавуну. Виконано розрахунки перспективної технології з витратою пиловугільного палива (ПВП) 180 кг/т чавуну і компенсації його негативного впливу за рахунок підготовки коксу до плавки, використання коксу поліпшеної якості, коксового горішка (до 80 кг/т чавуну), підвищення температури дуття, що дозволило знизити витрату коксу до 298,7 кг/т чавуну (176,9 кг/т чавуну, 37,2 % зниження від базового рівня) і підвищити продуктивність печі на 398,2 т/добу (12,7 %).

Ключові слова

Пиловугільне паливо, чавун, кокс, природний газ, коксовий горішок, доменна піч.

Summary

S.L. Yaroshevskiy¹, Doctor of Engineering Sciences, Prof., Professor at the Department; **V.V. Kochura**¹, Candidate of Engineering Sciences, Docent, Head of Department, e-mail: kochura@ukr.net; **A.M. Kuznetsov**², Candidate of Engineering Sciences, Blast-furnace Foreman; **I.V. Shulga**³, Candidate of Engineering Sciences, Docent, Head of Department; **A.S. Khaibulaev**², Head of Laboratory; **Z.K. Afanaseva**¹, Senior Lecturer

¹*Donetsk National Technical University, Donetsk, Ukraine*

²*Yenakiieve Iron and Steel Works, Yenakiieve, Ukraine*

³*SE "Ukrainian State Research Institute of Coal Chemistry", Kharkov, Ukraine*

Efficiency and resources of ironmaking with pulverized coal injection

The efficiency and resources of pulverized coal ironmaking technology are considered. The promising technology was calculated with a flow rate of pulverized coal (PC) of 180 kg/t of pig iron and compensation of its negative impact by preparing coke for smelting, using coke of improved quality, coke nut (up to 80 kg/t of pig iron), increasing the blast temperature, which reduced coke consumption to 298.7 kg/t of pig iron (176.9 kg/t of iron, 37.2 % reduction from the base level) and increased the furnace productivity by 398.2 tons/day (12.7 %).

Keywords

Pulverized coal, pig iron, coke, natural gas, coke nut, blast furnace.

Е.Н. Сигарев, д-р техн. наук, зав. кафедрой, e-mail: en_sigarev@ua.fm

Н.Н. Недбайло, аспирант

М.А. Кашеев, канд. техн. наук, доцент

Ю.В. Байдуж, аспирант

Днепропетровский государственный технический университет, г. Каменское, Украина

Совершенствование конструкции гарнисажной фурмы и технологии восстановления профиля рабочего пространства конвертера

В статье рассмотрены проблемы технологии ошлакования футеровки кислородного конвертера путем раздувки предварительно модифицированного магнезиальными добавками конвертерного шлака с использованием гарнисажных фурм.

Ключевые слова: профиль, фурма, футеровка, гарнисаж, конвертер, шлак, огнеупор.

Введение. Для стабилизации динамики фаз и дутьевого режима конвертерной плавки необходимым условием является обеспечение симметричности рабочего пространства кислородного конвертера в независимости от периода кампании агрегата по футеровке. На большинстве металлургических предприятий Украины, США, КНР применяются современные способы горячего ремонта футеровки конвертеров, в том числе путем раздувания модифицированного конечного конвертерного шлака с использованием специальных гарнисажных фурм [1, 2].

Как установлено исследованиями топографии износа футеровки по ходу кампании 250-т конвертеров конвертерного цеха ПАО «Днепропетровский меткомбинат» [3], осложнения в формировании равномерного по толщине слоя защитного шлакового гарнисажа и, соответственно, невозможность поддержания симметрии рабочего пространства (рис. 1, а), возникают вследствие опережающего износа футеровки в зонах 1 (рис. 1, б), расположенных в цилиндрической части агрегата между цапфенными зонами и зонами выпуска расплава и загрузки, на меридианах 50, 150, 215 и 310°.

В соответствии с принятой в цехе технологией нанесения шлакового гарнисажа, предварительно модифицированный присадками магнезиальных флюсов конечный конвертерный шлак раздувают сверхзвуковыми струями азота с использованием специальной гарнисажной 6-ти сопловой фурмы с сгруппированными по три в направлении цапфенных зон соплами Лавала двух различных диаметров (рис. 2, а). Наконечник фурмы имеет два основных, размещенных симметрично в направлении цапф конвертера, сопла Лавала с критическим ($d_{кр}$) и выходным ($d_{вих}$) диаметрами сопел 43 и 49 мм соответственно; четыре дополнительных сопла Лавала с $d_{кр} = 37$ мм и $d_{вих} = 43$ мм соответственно. Угол наклона сопел к вертикальной оси фурмы составляет $\alpha_1 = 17^\circ 30'$ и в плане между осями соседних сопел по $\gamma_1 = 50^\circ$ (между соплами $d_{кр} = 37$ мм и $d_{кр} = 43$ мм), а между группами сопел – $\gamma_2 = 80^\circ$ соответственно.

Раздувку шлаковой ванны проводят с использованием ступенчатого режима перемещения гарнисажной фурмы по высоте (в диапазоне от 4-х на начальном этапе до 0,5 м над днищем конвертера в основной период операции) с расходом азота 600–800 м³/мин.

Постановка задачи. Необходимо отметить, что многолетнее использование специально разработанной для условий ПАО «Днепропетровский меткомбинат» гарнисажной фурмы не позволило полностью решить проблему неравномерности нанесения шлакового гарнисажа и развития несимметричности рабочего пространства по мере уменьшения толщины футеровки.

С целью определения изменения конфигурации профиля рабочего пространства и фактической толщины сформированного с использованием для раздувки шлака 6-ти сопловой фурмы (рис. 2, а) гарнисажного слоя, провели [3] последовательное сканирование профиля с использованием интерферометра LaCam M007 (фирмы *Ferrotron Technologies GmbH*, Германия). Для повышения объективности оценки сканирование осуществляли как в первый период кампании 250-т конвертера по футеровке (500-я и 501-я плавки по футеровке – I-й этап), так и на завершающем этапе кампании (4010-я и 4131-я плавки – II-й этап сканирования).

С целью фиксации сканированием конфигурации исходного профиля рабочего пространства, перед началом конвертерных плавов № 500 и № 4130 (по футеровке), нанесение шлакового гарнисажа путем раздувки шлаковой ванны на футеровку не проводилось.

После выпуска стали и раздувки в течение 5–7 мин модифицированного присадками магнезиальных флюсов конечного шлака (с начальной массой 18,9 т / 20,1 т), с химическим составом, %: 45,3 / 49,1 CaO; 18,7 / 21,1 SiO₂; 6,9 / 7,3 MgO; 10,5 / 15,8 FeO (для I-го / II-го этапа сканирования соответственно), осуществляли повторное сканирование рабочего пространства для определения изменений в профиле рабочего пространства и расчета фактической толщины нанесенного на футеровку гарнисажного слоя.

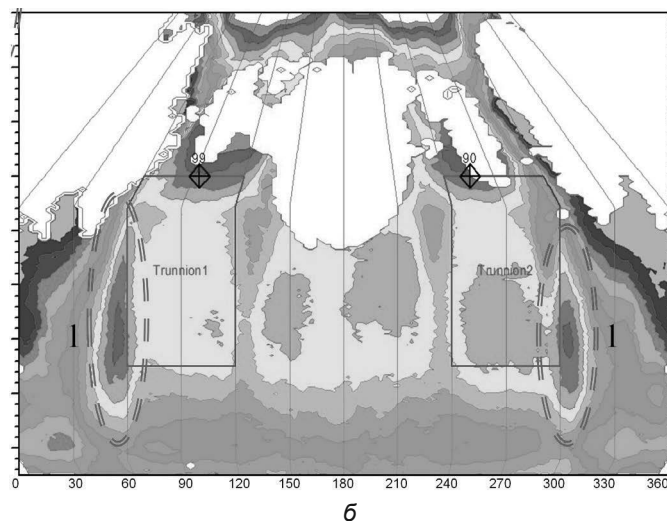
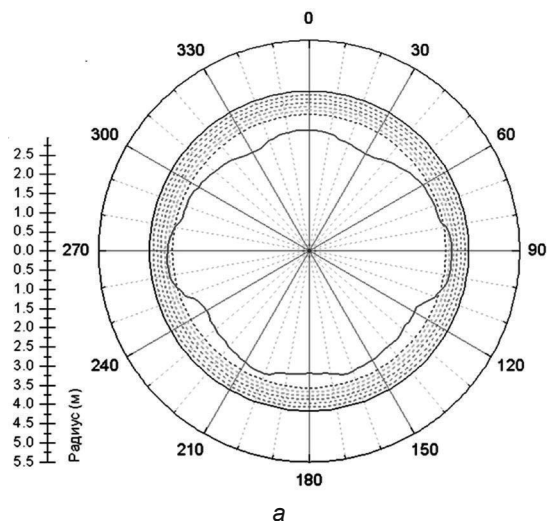
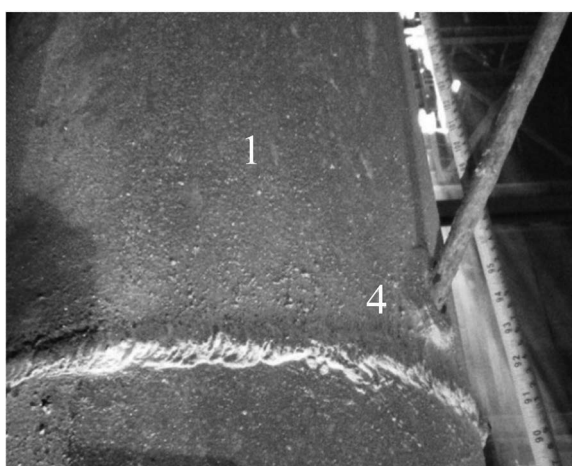


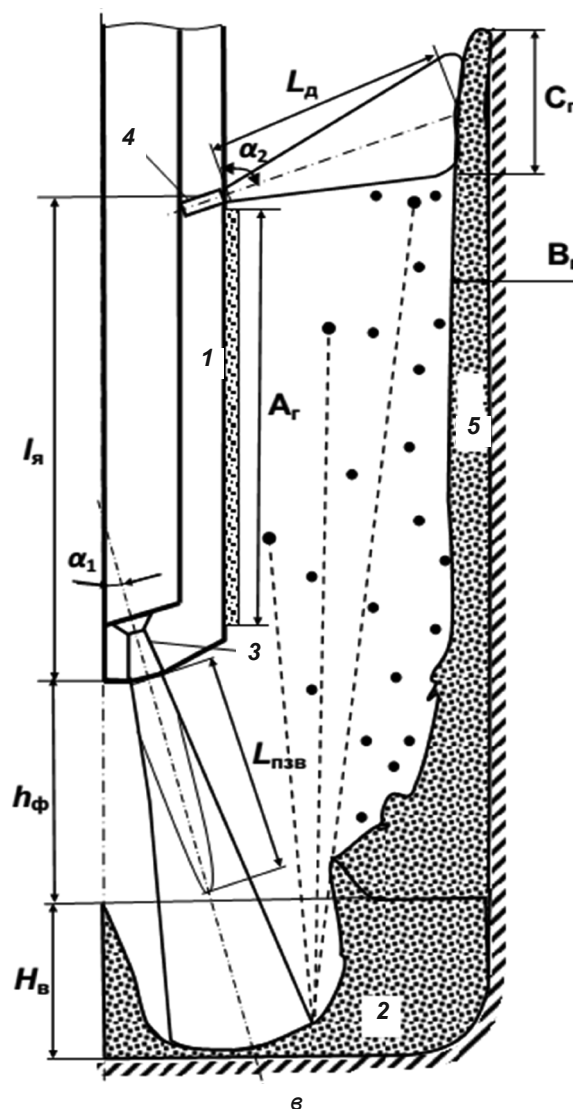
Рис. 1. Горизонтальное сечение профиля футеровки при использовании штатной 6-ти сопловой гарнисажной фурмы ПАТ «Днепропетровский меткомбинат» для нанесения шлакового гарнисажа (а) и выявленные по результатам сканирования зоны опережающего износа (1) футеровки (развертка конвертера) (б)



а



б



в

Рис. 2. Наконечник штатной гарнисажной фурмы (а), дополнительные цилиндрические сопла второго яруса фурмы (б) и схема раздувки шлаковой ванны (в): 1 – фурма; 2 – шлаковая ванна; 3 – сопла Лаваля наконечника фурмы; 4 – цилиндрические сопла второго яруса; 5 – гарнисажный шлаковый слой

Результаты проведенных исследований [3] показали, что толщина сформированного раздувкой шлаковой ванны гарнисажного шлакового слоя со-

ставляет 5–8 мм в районе горловины и 35–200 мм – в нижней части агрегата. Кроме того, установлено существование широкого диапазона значений толщины

гарнисажного слоя в различных зонах конвертера по радиусу рабочего пространства.

Расчетами, с использованием разработанной авторами данной статьи методики [4], определено, а в результате промышленных исследований подтверждено, что площадь нанесенного на поверхность футеровки «пятна» шлакового гарнисажа, ограничена сектором S_c и определяется количеством сопел Лавала в наконечнике фурмы, а высота гарнисажного «пятна» (ΔH), в соответствующем секторе, зависит от угла наклона сопел Лавала к вертикали.

Так, в соответствии с расчетами по методике [4], при расположении наконечника 6-ти сопловой фурмы (рис. 2, а) на высоте (h_{ϕ}) 4 м от днища конвертера, для нанесения на сектор S_c слоя гарнисажа толщиной 50 мм продолжительность раздувки должна составлять 3,3 мин. При расположении же фурмы на высоте 0,5 м толщина покрытия в 50 мм достигается раздувкой ванны продолжительностью уже в 5,9 мин. Последнее обстоятельство связано с изменением диаметров капель шлака, образующихся в реакционной зоне взаимодействия азотных струй со шлаковой ванной, с перемещением наконечника фурмы относительно уровня ванны.

Результаты исследований. Использование усовершенствованного, разработанного с применением методики [4], графика перемещения 6-ти сопловой фурмы по ходу операции раздувки ванны, не обеспечило решения задач по надлежащему «ошлакованию» выявленных «проблемных» зон (рис. 1) и восстановлению симметрии рабочего пространства конвертера.

Решение поставленных задач в условиях конвертерного цеха ПАО «Днепропетровский меткомбинат» затруднено также ввиду отсутствия специального оборудования для локального торкретирования футеровки.

Кроме того, конструкция штатной гарнисажной фурмы (рис. 2, а) не предназначена для корректировки направления движения шлаковых капель, выносимых из шлаковой ванны под влиянием газовых струй из сопел Лавала наконечника.

Для решения задачи по восстановлению симметрии профиля рабочего пространства, с достижением необходимой толщины гарнисажного слоя в определенных, в том числе «проблемных» зонах (рис. 1, б) на поверхности футеровки, целесообразным представлялось использование дополнительных управляющих факторов воздействия на газшлаковый поток, с перенаправлением части потока в заданный сектор на стене агрегата.

К ограничениям при перенаправлении части газшлакового потока в заданный сектор рабочего пространства относили необходимость получения гарнисажного слоя заданной толщины за время, не превышающее продолжительность раздувки шлаковой ванны. Учитывали также перманентное охлаждение и уменьшение уровня ванны, с повышением вязкости шлакового расплава, и изменение условий для «наращивания» гарнисажного слоя по мере уменьшения толщины футеровки по ходу кампании [5].

В наиболее простом варианте перенаправление части газшлакового потока на стены конвертера можно обеспечить при наличии дополнительных (бо-

ковых) газовых потоков, направленных под определенным углом к потоку, например, с использованием двухъярусной фурмы.

Влияние угла наклона и диаметра дополнительных боковых сопел на площадь сектора S_c , высоту гарнисажного «пятна» (ΔH) и схема раздувки шлаковой ванны с использованием двухъярусной фурмы исследованы и получили развитие по результатам физического моделирования гидрогазодинамики процесса раздувки [6].

На основании результатов математического [5] и физического моделирования [6] была спроектирована, изготовлена и опробована на 250-т конвертере, в условиях конвертерного цеха ПАО «Днепропетровский меткомбинат», двухъярусная 10-ти сопловая гарнисажная фурма (рис. 2, б). Схема раздувки шлаковой ванны фурмой с дополнительными боковыми соплами представлена на рис. 2, в.

Согласно расчетам, выполненным по методике [4], при кинетической энергии струй, истекающих из сопел Лавала, в 38883,18 Дж и 9915,5 Дж (для сопел с критическим диаметром 0,043 м и 0,037 м соответственно), расход энергии на образование поверхности раздела «газ-шлак» не превышает 1,5 Дж. Таким образом, подавляющая часть энергии струй расходуется на дробление шлакового расплава и формирование обратного газшлакового потока с выносом капель шлака различного диаметра на поверхность футеровки, ствол фурмы и за пределы конвертера через горловину.

С учетом приведенного выше, штатная гарнисажная фурма (рис. 2, а) была модернизирована путем размещения второго яруса боковых сопел (рис. 2, б), расположенных на стволе на расстоянии 2–2,5 м ($l_{\text{я}}$) от торца 6-ти сопловой наконечника. Второй ярус фурмы состоит из 4-х цилиндрических сопел, выполненных из жаропрочной стали и расположенных под углом 115° к поверхности ванны.

При соотношении расхода азота между боковыми и основными соплами 10-ти сопловой фурмы (рис. 2, б) как 17 % и 83 % от общего расхода азота (600–800 м³/мин) на раздувку ванны, давление газового потока, истекающего из бокового сопла фурмы на обратный газшлаковый поток, в плоскости пересечения с последним, составит, Н:

$$F = K \cdot Q \cdot V^2 \cdot \rho, \quad (1)$$

где K – безразмерный коэффициент; Q – объемный расход азота на раздувку ванны, м³/с; V , ρ – скорость и плотность газовой струи, м/с и кг/м³ соответственно.

С учетом величины давления струй азота из боковых сопел на обратный газшлаковый поток и на поверхность футеровки определили, что расстояние, на которое давление боковой газовой струи способно переместить капли шлака, одного порядка с размерами рабочего пространства конвертера (рис. 3, а).

Расчетом площади сечения боковых струй, с учетом изменения длины окружности внутренней поверхности футеровки 250-т конвертера, при уменьшении толщины последней по ходу кампании, определили, что каплями шлака, перемещенного газовыми струями

(100–130 м³/мин), истекающими из боковых сопел второго яруса фурмы в направлении к стенам, будет покрываться от 29,5 до 46,98 % рабочей поверхности футеровки агрегата.

Проверку возможности перенаправления части газошлакового потока в заданные сектора рабочего пространства конвертера выполнили с использованием методики планирования эксперимента на модели 250-т конвертера, изготовленной в масштабе 1:13 [6].

Полученная обработкой результатов физического моделирования [6] математическая модель зависимости толщины слоя нанесенного шлакового гарнисажа (B_r) в области «проблемных» зон на стенах конвертера (рис. 1, б) от расстояния между ярусами сопел двухъярусной фурмы имеет вид:

$$B_r = -0,642 + 0,43 \cdot H_b - 0,1476 \cdot h_{\phi} + 0,1507 \cdot l_{\text{я}} - 0,067 \cdot H_b \cdot l_{\text{я}} + 0,0166 \cdot h_{\phi} \cdot l_{\text{я}}, \quad (2)$$

где H_b – глубина шлаковой ванны; h_{ϕ} – расстояние между наконечником фурмы и днищем конвертера; $l_{\text{я}}$ – расстояние между осями боковых сопел и торцом наконечника фурмы.

Наибольшая толщина гарнисажного покрытия, за один и тот же промежуток времени раздувки шлака, обеспечивается в режиме выноса газошлакового потока из ванны уменьшенной глубины, что может быть связано с образованием значительного количества мелких шлаковых капель [4] и благоприятными условиями их перемещения в направлении секторов S_c на стенах конвертера под давлением газового потока из сопел второго яруса фурмы.

Математическая модель зависимости ширины зоны покрытия шлаковым гарнисажем (C_r) в области «проблемных» зон футеровки конвертера от расстояния между ярусами сопел двухъярусной фурмы имеет вид:

$$C_r = -2,5825 + 6,0825 \cdot H_b + 0,0825 \cdot h_{\phi} + 0,168 \cdot l_{\text{я}} - 0,2475 \cdot H_b \cdot h_{\phi} - 0,1675 \cdot H_b \cdot l_{\text{я}}. \quad (3)$$

Ширина зоны в основном определяется глубиной шлаковой ванны и уменьшается по мере подъема

фурмы (рис. 3, б). Это объясняется увеличением диаметра реакционной зоны взаимодействия газовых струй, истекающих из сопел Лаваля, с ванной и перемещением границ обратного газошлакового потока в нижние горизонты рабочего пространства конвертера.

Таким образом, расчетами с использованием методики [4], полученными в ходе физического [6] и численного моделирования [5], и с использованием моделей (2) и (3) подтверждено, что при использовании газовых потоков, истекающих из дополнительных боковых сопел в направлении «проблемных» зон, существует возможность перенаправления части шлаковых капель, вынесенных из ванны, на стены агрегата. Это расширяет возможности для корректировки и изменения профиля внутреннего рабочего пространства конвертера путем создания гарнисажного слоя заданной толщины за ограниченный длительностью раздувки шлаковой ванны промежуток времени.

Конструкция гарнисажной двухъярусной фурмы (рис. 2, б) была использована в ходе опытно-промышленной кампании 250-т конвертера ПАО «Днепропетровский меткомбинат» для горячего ремонта футеровки по штатной технологии нанесения гарнисажного покрытия путем раздувки ванны конечного конвертерного шлака.

Продолжительность операции нанесения шлакового покрытия составила 4–7 мин, в зависимости от жидкоподвижности и количества конвертерного шлака, оставленного после выпуска стали. Осложнений в проведении ошлакования футеровки конвертера, соблюдении требований технологической инструкции при использовании двухъярусной гарнисажной фурмы (рис. 2, б) не выявлено.

Условия и результаты проведения горячего ремонта футеровки путем нанесения шлакового гарнисажа с использованием опытно-промышленной (рис. 2, б) и сравнительной (рис. 2, а) конструкций гарнисажных фурм приведены в таблице. Необходимо отметить, что в период задействования опытной двухъярусной фурмы (рис. 2, б) не использовали магнезиальные флюсы (п. 10 таблицы) для модифицирования конвертерного шлака перед раздувкой на футеровку.

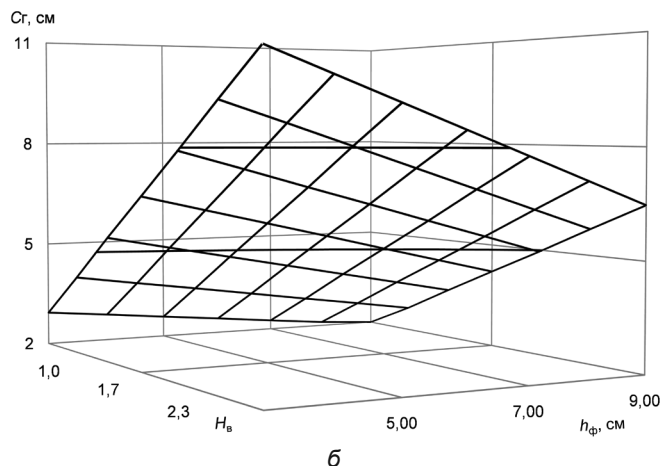
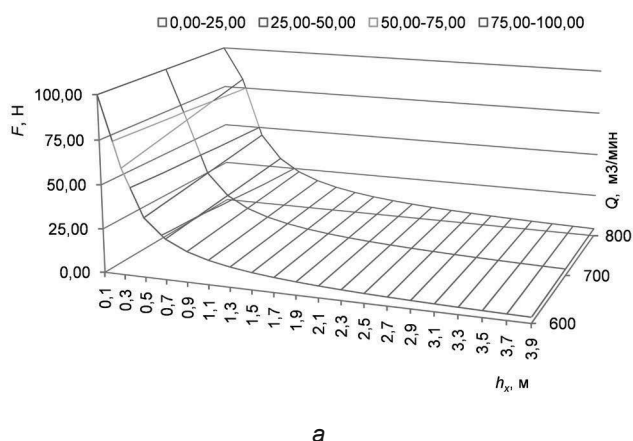


Рис. 3. Зависимость давления газовой струи, истекающей из бокового сопла второго яруса фурмы, (рис. 2, б) диаметром 20 мм по сечению газошлакового потока от расстояния от торца сопла (а) и ширина зоны покрытия шлаком «проблемной» зоны (рис. 1, б) на стене конвертера

Результаты исследовательской и сравнительной кампании 250-т конвертера

№	Показатель	Сравнительная кампания	Исследовательская кампания	Отклонение
1	Толщина футеровки (арматурный и рабочий слой), мм	1210	1080	– 130
2	Стойкость футеровки, плавов, в т.ч.:	3408	3731	+ 323
	– рабочего слоя	2480	2235	– 245
	– арматурного слоя	928	1496	+ 568
3	Интенсивность работы конвертера, пл./сутки	14,2	11,4	– 2,8
4	Продолжительность простоев конвертера, час	384	749	+ 365
5	% плавов с нанесением гарнисажа путем раздувки шлака	77,6	80,9	+ 3,3
6	Интенсивность износа футеровки, мм/пл., в т.ч.:			
	– в начальный период кампании по футеровке (до 800 плавки)	0,60	0,39	– 0,21
	– в основной период кампании	0,30	0,29	– 0,01
	– арматурного слоя	0,24	0,16	– 0,08
7	Характеристика конечного шлака перед раздувкой:			
	- среднее содержание (FeO), %, в т.ч.	15,9	15,2	– 0,7
	– с (FeO) > 20 %	11,8	2,8	– 9,0
	– с (FeO) < 8 %	0,7	0,9	+ 0,2
	- среднее содержание (MgO), %, в т.ч.	6,5	6,8	+ 0,3
	– с (MgO) < 8 %	85,6	27,8	– 57,8
8	Основность шлака, ед.	2,3	2,4	+ 0,1
9	Количество плавов, с температурой выпуска стали более 1700 °С, %	4,4	6,3	+ 1,9
10	Удельные расходы, кг/т:			
	– доломитизированной извести	65,3	66,8	+ 1,5
	– магнезиальных флюсов	0,564	0	– 0,564
11	Удельные расходы огнеупоров, кг/т	0,829	0,705	– 0,124
12	Удельные затраты на огнеупорные материалы для ремонта футеровки, %	100	93,99	– 6,01

Кроме того, начальная толщина футеровки конвертера в опытно-промышленной кампании была уменьшена на 130 мм, что, в соответствии с результатами моделирования [7], способствует «наращиванию» гарнисажного шлакового слоя.

Использование опытной фурмы и предложенной схемы раздувания шлаковой ванны (рис. 2, в), с обеспечением перенаправления части газшлакового потока, позволило наносить слой гарнисажного покрытия необходимой, в данном секторе, толщины, уменьшить вынос капель шлака через горловину конвертера и степень зашлакованности ствола фурмы.

Использование уменьшенной начальной толщины футеровки и расчетного [4, 7] алгоритма перемещения фурмы по ходу раздувки шлака расширяет возможности для корректировки и обеспечения симметрии рабочего пространства конвертера по футеровке (рис. 4, а, б) по ходу кампании.

После завершения первого этапа опытно-промышленной кампании на конвертере № 1 двухъярусная гарнисажная фурма была установлена также и на конвертере № 2 (после 2382 плавки по футеровке). На рис. 4, в представлен профиль футеровки 250-т конвертера (вертикальный разрез) на 2383 (1) и 2469 (2) плавках по футеровке.

Установлено, что при использовании для раздувки шлака штатной гарнисажной фурмы (рис. 2, а),

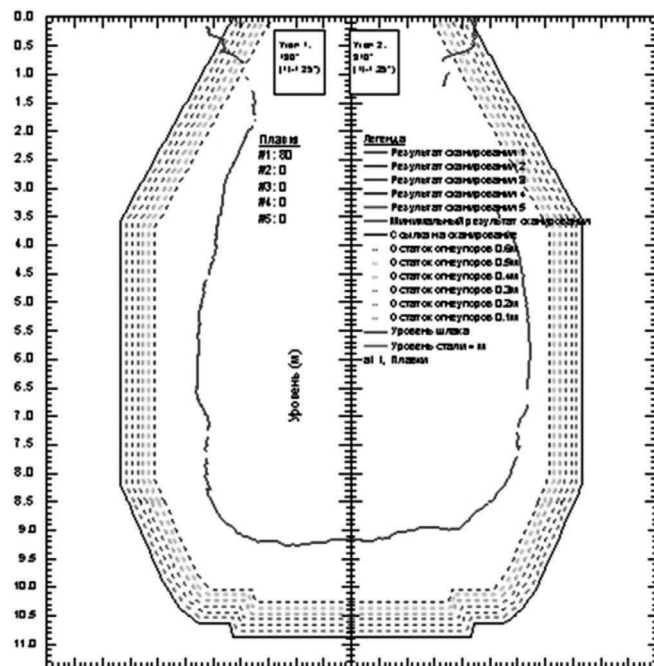
аварийное уменьшение толщины рабочего слоя футеровки было достигнуто уже на плавке № 2382 (по футеровке). После замены 6-ти сопловой фурмы на двухъярусную гарнисажную фурму (рис. 2, б) проведение раздувки шлака с перенаправлением части газшлакового потока в аварийные зоны позволило, в значительной степени, обеспечить к 2469 плавке рациональный профиль рабочего пространства конвертера (рис. 4, в) за счет управляемого «наращивания» гарнисажного шлакового слоя заданной толщины и его распределения по высоте агрегата.

Дальнейшее штатное использование предложенной конструкции фурмы (рис. 2, б) для ошлакования футеровки позволило в период как с 2469 до 2956 плавки (рис. 4, з), так и до завершения кампании, поддерживать рациональный профиль рабочего пространства конвертера.

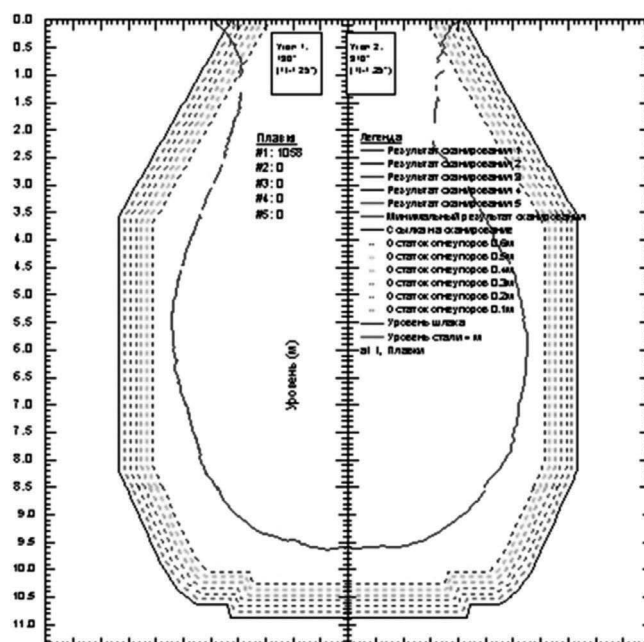
Необходимо отметить, что при применении двухъярусных гарнисажных фурм (рис. 2, б), размывания нанесенного гарнисажного шлакового слоя в секторах пересечения газовых потоков из боковых сопел (рис. 2, в) и стен конвертера не обнаружено.

Предложенные конструкции фурм введены в штатную эксплуатацию в конвертерном цехе ПАО «Днепропетровский меткомбинат» с 2016 года.

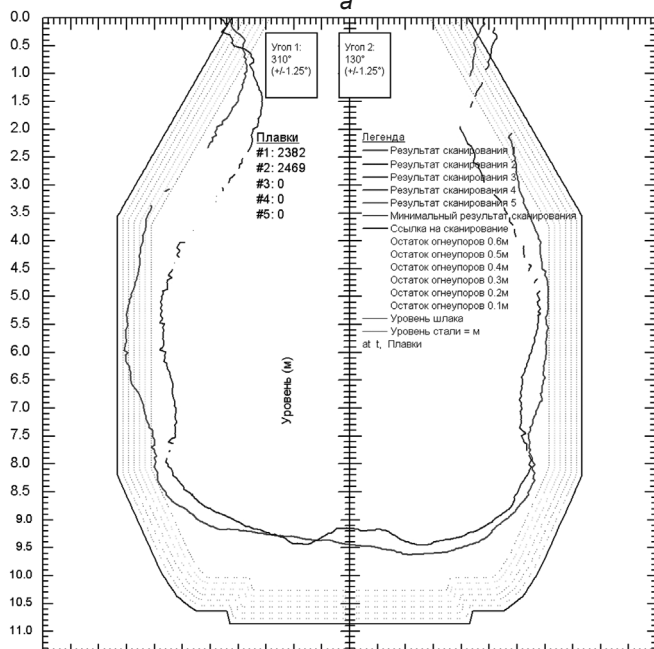
При внедрении усовершенствованной конструкции гарнисажной фурмы и технологии нанесения



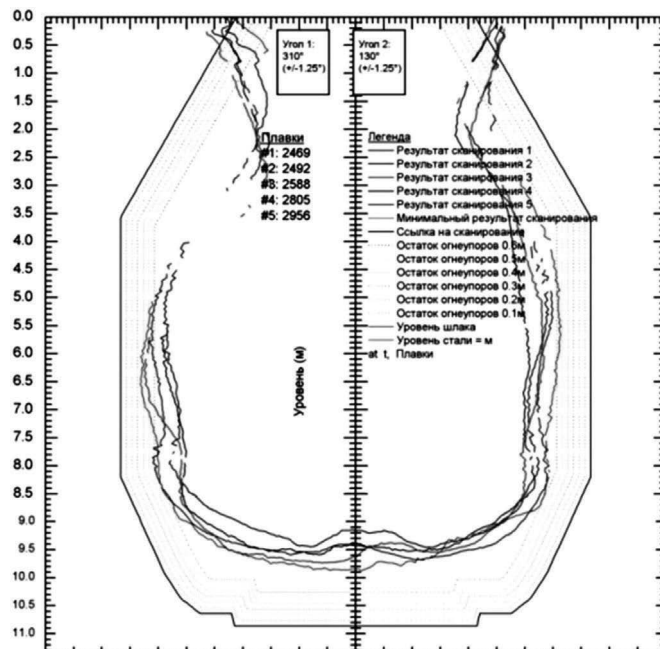
а



б



в



г

Рис. 4. Профиль рабочего пространства конвертера (а) до начала использования двухъярусной фурмы (рис. 2, б), скорректированный профиль в период использования двухъярусной фурмы (б), восстановление рационального профиля после аварийного уменьшения толщины футеровки (в) и поддержание рационального профиля по ходу кампании конвертера (г). Вертикальный разрез по меридиану 130°–310°. 1 – зона аварийного уменьшения толщины рабочего слоя футеровки после 2382 плавки; 2 – гарнисажный шлаковый слой на футеровке, сформированный в период с 2382 по 2469 плавку по футеровке

шлакового гарнисажа раздувкой шлаковой ванны в условиях конвертерного цеха ПАО «Днепропетровский меткомбинат» достигнут ресурсосберегающий и экономический эффект за счет:

- повышения производительности конвертеров вследствие уменьшения продолжительности простоев на горячий ремонт футеровки на 1,35 %;
- повышения стойкости футеровки конвертеров на 9,5 %;
- уменьшения расхода огнеупорных материалов, которые используются для горячего ремонта футеровки на 6,01 %.

Экономический эффект от применения усовершен-

ствованной конструкции фурмы за 2016 г. составил 1,96 грн/т стали.

Выводы

Предложена усовершенствованная технология проведения ошлакования футеровки путем раздувки шлаковой ванны и конструкция двухъярусной гарнисажной фурмы для корректировки и поддержания рационального профиля рабочего пространства кислородного конвертера.

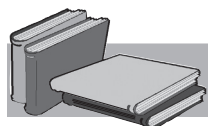
Разработана и внедрена в промышленную эксплуатацию конструкция двухъярусной фурмы с допол-

нительными боковыми соплами на стволе, предназначенными для перенаправления части обратного газшлакового потока, образующегося при раздувке шлаковой ванны азотными струями, на заданные «проблемные» зоны на футеровке. Использование двухъярусной гарнисажной фурмы для ошлакования футеровки не вызвало осложнений и не привело к размыванию нанесенного гарнисажного шлакового слоя в секторах пересечения газовых потоков из боковых сопел и стен конвертера.

Разработаны технологические рекомендации для проведения операции ошлакования футеровки

конвертера с учетом возможности формирования и поддержания рационального профиля рабочего пространства агрегата нанесением гарнисажного шлакового слоя заданной толщины.

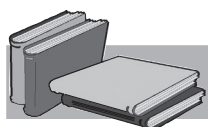
Обеспечено уменьшение интенсивности выноса шлака за пределы конвертера и степень зашлакованности ствола фурмы, сокращение удельных расходов огнеупорных материалов при увеличении стойкости футеровки.



ЛИТЕРАТУРА

1. Protopopov E.V., Chernyatevich A.G., Feiler S.V., Sigarev E.N. Applying slag coatings to the converter lining // *Steel in Translation*. – 2014. – Vol. 44. – № 6. – P. 403–407.
2. Chernyatevich A.G., Sigarev E.N., Chernyatevich I.V., Chubin K.I., Chubina E.A. New system for applying a slag coating to the converter lining // *Steel in Translation*. – 2017. – Vol. 47. – № 6. – P. 394–398.
3. Сигарев Е.Н., Сигарев Н.К., Семенова Д.А., Байдуш Ю.В. Топографирование поверхности футеровки конвертера // *Збірник наукових праць Дніпродзержинського технічного університету: (технічні науки)*. – Дніпродзержинськ: ДДТУ. – 2015. – Вип. 1 (26). – С. 19–24.
4. Сигарев Е.Н., Низяев К.Г., Сигарев Н.К., Недбайло Н.Н., Байдуш Ю.В. Определение параметров раздувки шлаковой ванны на футеровку конвертера // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2016. – № 3. – С. 31–36.
5. Сигарев Е.Н., Сокол А.Н., Недбайло Н.Н. Компьютерное моделирование теплового состояния системы «гарнисаж – футеровка» с учетом неравномерности ее толщины // *Математичне моделювання*. – 2016. – № 2 (35). – С. 70–73.
6. Сигарев Е.Н., Чернятевич А.Г., Недбайло М.М., Чернятевич І.В. Дослідження гідрогазодинамічних закономірностей нанесення шлакового гарнісажу на футеровку конвертера комбінованого дуття // *Теорія і практика металургії*. – 2015. – № 1, 2 (102–103). – С. 204–206.
7. Сигарев Е.Н., Сокол А.Н., Недбайло Н.Н. Компьютерное моделирование нанесения шлакового гарнисажа на футеровку конвертера при изменении положения фурмы // *Математичне моделювання*. – 2015. – № 1 (32). – С. 56–58.

Поступила 18.10.2018



REFERENCES

1. Protopopov, E.V., Chernyatevich, A.G., Feiler, S.V., Sigarev, E.N. (2014). Applying slag coatings to the converter lining. *Steel in Translation*, Vol. 44, no. 6, pp. 403–407 [in English].
2. Chernyatevich, A.G., Sigarev, E.N., Chernyatevich, I.V., Chubin, K.I., Chubina, E.A. (2017). New system for applying a slag coating to the converter lining. *Steel in Translation*, Vol. 47, no. 6, pp. 394–398 [in English].
3. Sigarev, E.N., Sigarev, N.K., Semenova, D.A., Bayduzh, Y.V. (2015). Topography of the converter liner surface. *Zbirnyk naukovykh prats' Dniprodzerzhyns'kogo tekhnichnogo universytetu (tekhnichni nauky)*. Dniprodzerzhyns'k: DDTU, Vol. 1 (26), pp. 19–24 [in Russian].
4. Sigarev, E.N., Nizyaev, K.G., Sigarev, N.K., Nedbailo, N.N., Bayduzh, Yu.V. (2016). Determination of the parameters of blowing the slag bath on the lining of the converter. *Metallurgical and mining industry*, no. 3, pp. 31–36 [in Russian].
5. Sigarev, E.N., Sokol, A.N., Nedbailo, N.N. (2016). Computer simulation of the thermal state of the “garbage-lining” system, taking into account the unevenness of its thickness. *Matematychni modeliuvannia*, no. 2 (35), pp. 70–73 [in Russian].
6. Sigarev, E.N., Chernyatevich, A.G., Nedbailo, N.N., Chernyatevich, I.V. (2015). Investigation of the hydrogazodynamic laws of applying a slag garrison on the lining of the combined blower converter. *Theory and practice of metallurgy*, no. 1, 2 (102–103), pp. 204–206 [in Ukrainian].
7. Sigarev, E.N., Sokol, A.N., Nedbailo, N.N. (2015). Computer simulation of the application of the slag skull to the lining of the converter with a change in the position of the lance. *Matematychni modeliuvannia*, no. 1 (32), pp. 56–58 [in Russian].

Received 18.10.2018

Анотація

Є.М. Сігарьов, д-р техн. наук, зав. кафедри, e-mail: en_sigarev@ua.fm;
М.М. Недбайло, аспірант; **М.А. Кащєєв**, канд. техн. наук, доцент;
Ю.В. Байдуж, аспірант

*Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське,
Україна*

Удосконалення конструкції гарнісажної фурми та технології відновлення профілю робочого простору конвертера

У статті розглянуто проблеми технології ошлакування футерівки кисневого конвертера шляхом роздування попередньо модифікованого магнезійними добавками конвертерного шлаку з використанням гарнісажних фурм.

Ключові слова

Профіль, фурма, футерівка, гарнісаж, конвертер, шлак, вогнетрив.

Summary

E.N. Sigarev, Doctor of Engineering Sciences, Head of Department, e-mail: en_sigarev@ua.fm; **N.N. Nedbailo**, Postgraduate Student; **M.A. Kasheev**, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor; **Yu.V. Bayduzh**, Postgraduate Student

Dniprovsk State Technical University, Kamenskoye, Ukraine

Improving the construction of the garnissage tuyere and technology restoring the converter working space profile

The article deals with the problems of «splash-slag» technology for the lining of the oxygen converter by blowing the converter's slag, previously modified by magnesia additives, with the use of special lances.

Keywords

Profile, tuyere, lining, skull, converter, slag, refractory.

С.И. Губенко¹, д-р техн. наук, проф. кафедры, e-mail: sigubenko@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5427-1154>

Э.В. Парусов², канд. техн. наук, ст. науч. сотр., зав. отделом, e-mail: tometal@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-4560-2043>

О.В. Парусов², канд. техн. наук, ст. науч. сотр., e-mail: termet@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-9879-6179>

И.Н. Чуйко², канд. техн. наук, ст. науч. сотр., e-mail: ferrosplav@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-4753-614X>

¹Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепр, Украина

²Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины, г. Днепр, Украина

Особенности влияния неметаллических включений на механические свойства и малоцикловую долговечность стальных канатов при эксплуатации в агрессивных средах

Установлено влияние неметаллических включений на механические свойства и малоцикловую долговечность стали С72D (EN 16120-2:2011) в агрессивных средах. Установлен и обоснован последовательный убывающий ряд неметаллический включений, который характеризует степень их вредного влияния на зарождение и развитие коррозионных повреждений проволок наружного слоя стального каната из стали С72D. Обосновано самое вредное влияние сульфидных и гетерофазных включений на зарождение и развитие коррозионных повреждений в процессе эксплуатации стальных канатов в различных средах.

Ключевые слова: неметаллические включения, стальной канат, высокоуглеродистая сталь, малоцикловая долговечность, механические свойства.

Актуальность и состояние вопроса исследования. Стальные канаты подъемно-транспортных устройств зачастую эксплуатируются в сложных условиях высоких нагрузок, которые вызывают накопление напряжений и усталостных трещин, а взаимодействие металла с окружающей средой и агрессивными компонентами приводит к появлению коррозионных повреждений.

Известно, что в процессе хранения, транспортировки и эксплуатации канатов происходит физико-химическое взаимодействие наружных проволок каната с окружающей средой, что вызывает их коррозию [1–3]. Это может приводить к ухудшению функциональных характеристик и, следовательно, снижению надежности и долговечности стальных канатов. После изготовления канаты могут храниться в складских помещениях, в морских и речных портах, перевозиться различными видами транспорта в течение продолжительного времени – от нескольких недель до двух и более месяцев. На развитие коррозионных повреждений наружных проволок каната влияют следующие показатели: характер окружающей среды, влажность, химический состав стали, наличие агрессивных компонентов, температура и т. д. Влияние агрессивных компонентов на коррозию зависит от их концентрации в атмосфере, влажности воздуха, увлажнения поверхности металла, его коррозионной стойкости и от мер, которые были предприняты для защиты поверхности стального каната.

На скорость атмосферной коррозии канатов значительное влияние также оказывают резкие колебания температур [1–3]. Повышение коррозионной агрессивности при переходе от отрицательных температур к положительным объясняется повышением скорости электрохимических процессов и связано с

фазовым переходом влаги на поверхности металла из твердого агрегатного состояния в жидкое [1–3].

К специфическим условиям эксплуатации стальных канатов можно отнести: нагрузки с большими амплитудами колебаний и большим коэффициентом динамичности, высокую степень коррозионного воздействия окружающей среды, контакт с абразивной средой, не всегда выдержанное соотношение диаметров опорных поверхностей к диаметру каната. Перечисленные условия работы снижают срок службы канатов в процессе эксплуатации подъемно-транспортных механизмов.

Полнота представлений о влиянии различных факторов на структурные и фазовые превращения в канатной стали при эксплуатации, хранении и транспортировке в различных условиях – необходимое условие для разработки эффективных методов и средств обеспечения высокого уровня надежности и долговечности стальных канатов подъемно-транспортных устройств. Однако механизмы таких изменений в результате воздействия нагрузок совместно с физико-химическими процессами взаимодействия с агрессивными компонентами окружающей среды изучены недостаточно.

Цель работы – установить влияние неметаллических включений на изменение механических свойств и малоцикловую долговечность стальных канатов из стали С72D при эксплуатации в агрессивных средах.

Материал и методика исследований. В качестве материала использована проволока третьего (наружного) слоя диаметром 2,20 мм каната ЛК-РО Ø 39,0 мм конструкции 6×36(1+7+7/7+14)+7×7(1+6) из стали С72D (EN 16120-2:2011) следующего химического состава (в %): 0,73 – С; 0,68 – Мп; 0,22 – Si;

0,012 – P; 0,009 – S; 0,03 – Ni; 0,04 – Cr; 0,07 – Cu; 0,004 – N. Образцы проволоки отбирали от канатов после эксплуатации. Используемое оборудование: световой оптический микроскоп «Neophot-32»; растровый электронный микроскоп «VEGA TS5130MM», оборудованный энергодисперсионным спектрометром «INCA ENERGY-300». При проведении исследований использовали ускоренные методы коррозионных испытаний, которые позволяют за короткое время вызвать очевидное разрушение специально полученных в лабораторных условиях программно загрязненных включениями плавки стали C72D: плавка № 1 – сульфиды: (Fe, Mn)S, FeS-MnS, плавка № 2 – корунд и шпинели: Al_2O_3 , $MgO \cdot Al_2O_3$, $MnO \cdot Al_2O_3$, плавка № 3 – силикаты: SiO_2 , $MnO \cdot SiO_2$, $FeO \cdot SiO_2$. Испытания на малоцикловую усталость проводили на воздухе и в коррозионных средах: 5 %-ый водный раствор NaCl (среда № 1), 1 %-ный водный раствор H_2SO_4 (среда № 2). Выбор коррозионных сред обусловлен тем, что они наиболее близко имитировали среды, в которых эксплуатируются стальные канаты. Ускоренные испытания склонности стали C72D к коррозионному растрескиванию выполняли на установке «ИМ-12» по ISO 7384:2001 «Методы коррозионных испытаний». Усталостную прочность определяли по ГОСТ 25.502-79 «Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость» на машине типа «НУ» при базе $N = 3 \cdot 10^6$ циклов нагружений.

Результаты исследований и их обсуждение.

В изношенной проволоке из стали C72D в зонах коррозионного разрушения наблюдаются скопления неметаллических включений. Микрорентгеноспектральный анализ неметаллических включений показал, что основными химико-минералогическими их типами являются: оксиды алюминия (корунд, шпинели), сульфиды (Fe, Mn)S, FeS-MnS, силикаты различного типа (SiO_2 , $MnO \cdot SiO_2$, $FeO \cdot SiO_2$, железо-марганцево-силикатные стекла), гетерофазные включения сложного состава (оксисиликаты с частицами карбида кремния, оксидов, CaF_2 , $nMeO \cdot mAl_2O_3 \cdot kCaF_2$, где в оксиде MeO как в твердом растворе может быть несколько элементов, таких как Fe, Mg, Ca, Mn, а также оксисульфосиликаты).

С целью изучения причин коррозионного разрушения стали C72D были получены программно загрязненные неметаллическими включениями опытные плавки по методике, изложенной в работах [4–6]: плавка № 1 с сульфидными (Fe, Mn)S, FeS-MnS; плавка № 2 с включениями корунда и шпинели Al_2O_3 , $MgO \cdot Al_2O_3$, $MnO \cdot Al_2O_3$; плавка № 3 с силикатами SiO_2 , $MnO \cdot SiO_2$, $FeO \cdot SiO_2$. Вследствие методических трудностей не представлялось возможным получить опытную плавку, программно загрязненную гетерофазными включениями сложного состава (оксисиликаты и оксисульфосиликаты), однако во всех трех опытных плавках отдельно наблюдали за этими включениями, которые присутствуют в исследуемой стали.

После испытаний в активных средах вблизи различных видов включений в стали C72D наблюдается зарождение коррозионных повреждений (рисунок, а–в), которые наблюдались ранее авторами насто-

ящей работы в сталях ШХ15 и ШХ15СГ (рисунок, а) [7]. При испытаниях на малоцикловую усталость на воздухе лабораторных плавки стали C72D четко прослеживается влияние вида включений на усталостные характеристики (табл. 1): самое низкое значение величины N получено для стали, загрязненной сульфидными (плавка № 1), затем значение N повышается при наличии корунда и шпинелей (плавка № 2), и, наконец, самое высокое значение величины N получено в случае силикатов (плавка № 3).

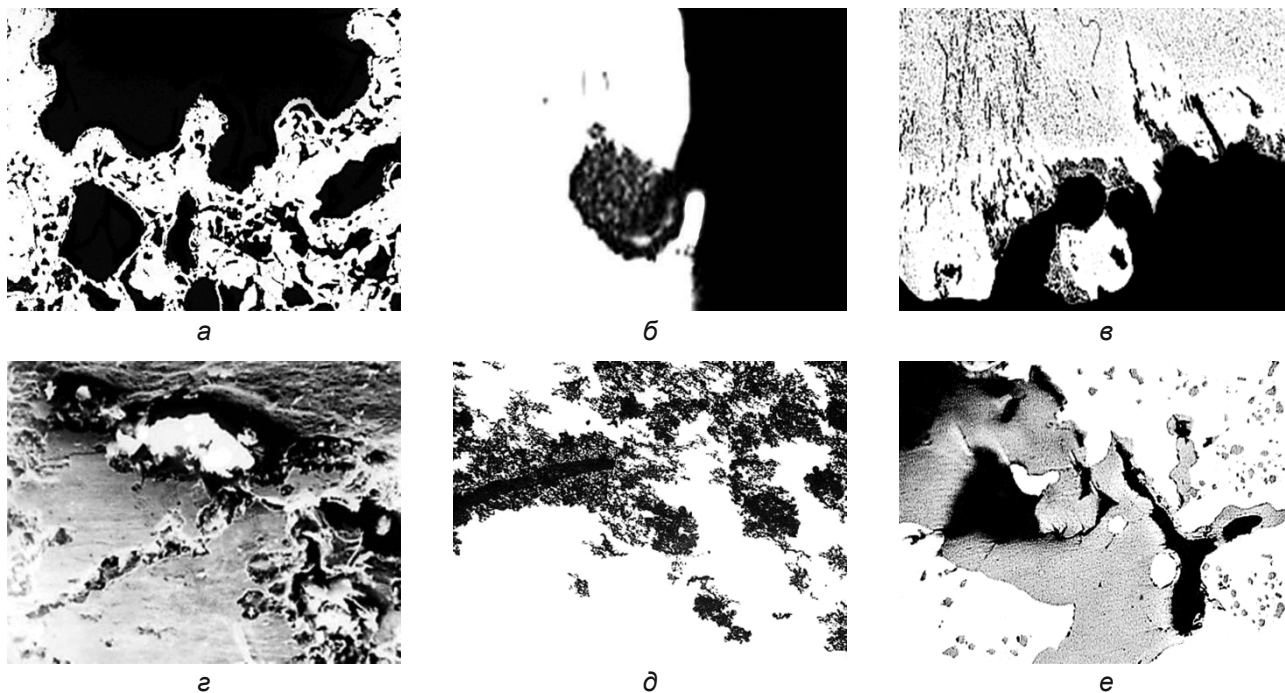
Коррозионная среда приводит к существенному снижению долговечности сталей при малоцикловой усталости, причем вид включений оказывает существенное влияние на этот показатель: по мере увеличения долговечности при малоцикловой усталости опытные плавки стали C72D выстроились в аналогичный возрастающий ряд [7]: самое низкое значение показателя N у стали плавки № 1, затем оно повышается для плавки № 2, и максимальное значение фиксируется для плавки № 3.

Коэффициент влияния среды (β_c) представляет собой отношение долговечности стали на воздухе к аналогичному показателю в коррозионной среде. Чем больше значение этого коэффициента, тем сильнее снижают неметаллические включения малоцикловую долговечность стали. Результаты исследований позволили расположить виды включений в убывающий ряд, который характеризует степень их вредного воздействия на зарождение и развитие коррозионных повреждений стали C72D: оксисульфосиликаты, сульфиды (Fe, Mn)S, FeS-MnS → корунд и шпинели Al_2O_3 , $MgO \cdot Al_2O_3$, $MnO \cdot Al_2O_3$ → оксисиликаты, силикаты SiO_2 , $MnO \cdot SiO_2$, $FeO \cdot SiO_2$. Необходимо отметить, что аналогичная зависимость (с учетом некоторых различий в химико-минералогическом составе аналогичных видов включений) была получена авторами для сталей ШХ15 и ШХ15СГ [7], а также для колесной стали и стали типа 08 [4–6]. Однако в регрессном ряде для указанных сталей на

Таблица 1

Малоцикловая долговечность (N) стали C72D в различных средах и коэффициент влияния среды β_c в зависимости от вида включений

Среда	Номер плавки; включения	$N \cdot 10^6$	β_c
Воздух	№ 1; (Fe, Mn)S, FeS-MnS	1,6	–
	№ 2; Al_2O_3 , $MgO \cdot Al_2O_3$, $MnO \cdot Al_2O_3$	2,0	–
	№ 3; SiO_2 , $MnO \cdot SiO_2$, $FeO \cdot SiO_2$	2,2	–
5 %-ный водный раствор NaCl	№ 1; (Fe, Mn)S, FeS-MnS	0,9	1,77
	№ 2; Al_2O_3 , $MgO \cdot Al_2O_3$, $MnO \cdot Al_2O_3$	1,4	1,42
	№ 3; SiO_2 , $MnO \cdot SiO_2$, $FeO \cdot SiO_2$	1,5	1,46
1 %-ный водный раствор H_2SO_4	№ 1; (Fe, Mn)S, FeS-MnS	0,6	2,66
	№ 2; Al_2O_3 , $MgO \cdot Al_2O_3$, $MnO \cdot Al_2O_3$	1,3	1,54
	№ 3; SiO_2 , $MnO \cdot SiO_2$, $FeO \cdot SiO_2$	1,4	1,57



Коррозионное разрушение сталей ($\times 600$): а – изношенная канатная проволока из стали C72D; б, в, д, е – опытные плавки стали C72D; г – сталь ШХ15 [7]; б, в, е – 5 %-ный водный раствор NaCl; в, д – 1 %-ный водный раствор H_2SO_4

последнем месте по вредному влиянию на коррозию был карбонитрид титана (TiCN), который отсутствует в стали C72D. В то же время, необходимо объяснить появление в убывающем ряду гетерофазных включений, присутствующих в стали C72D.

Гетерофазные включения сложного состава, присутствующие в опытных плавках, также являлись центрами зарождения коррозионных повреждений (рисунок, д, е). Степень вредного влияния на образование очагов коррозии следует рассматривать с учетом структуры таких включений. Неметаллические включения, обозначенные выше как оксисиликаты, представляют собой силикатную «матрицу» включения, в которой находятся частицы оксидов CaF_2 , $nMeO \cdot mAl_2O_3 \cdot CaF_2 \cdot kSiO_2$ – это так называемые гетерофазные включения четвертого типа «дисперсные фазы в неметаллической матрице» [4, 5, 8]. Либо эти включения содержат частицы фаз оксидов CaF_2 , $nMeO \cdot mAl_2O_3 \cdot CaF_2 \cdot kSiO_2$, окруженных силикатной оболочкой, – это так называемые гетерофазные включения первого типа «тугоплавкая фаза, окруженная легкоплавкой оболочкой» [4–6]. Поэтому гетерофазные включения оксисиликатов, которые имеют базовую силикатную фазу, оказывают влияние на зарождение коррозионных повреждений подобно силикатным включениям более простого состава (SiO_2 , $MnO \cdot SiO_2$, $FeO \cdot SiO_2$) и их можно добавить в убывающий ряд вместе с ними. В то же время, присутствие частиц других фаз во включениях оксисиликатов должно оказывать стимулирующее влияние на зарождение коррозионных повреждений из-за наличия внутренних межфазных границ во включениях, которые являются «каналами» для развития адсорбционных и коррозионных процессов [4–6]. Именно по этой причине гетерофазные оксисиликатные включения указаны первыми в убывающем ряду среди силикатов.

Что касается гетерофазных включений, классифицируемых как оксисульфосиликаты, – как правило, сульфидная фаза образует оболочку вокруг частиц оксидов и силикатов, поэтому их можно отнести к так называемым гетерофазным включениям первого типа «тугоплавкая фаза, окруженная легкоплавкой оболочкой» [4–6]. Поэтому гетерофазные включения оксисульфосиликатов, имеющие сульфидную оболочку, оказывают влияние на зарождение коррозионных повреждений подобно сульфидным включениям более простого состава $(Fe, Mn)S$, $FeS-MnS$ и их можно добавить в убывающий ряд вместе с ними. Присутствие частиц оксидных и силикатных фаз во включениях оксисульфосиликатов должно оказывать стимулирующее влияние на зарождение коррозионных повреждений из-за наличия внутренних межфазных границ во включениях, которые, как и в случае оксисиликатов, являются «каналами» для развития адсорбционных и коррозионных процессов [4–6]. Именно поэтому гетерофазные оксисульфосиликатные включения указаны первыми в убывающем ряду среди сульфидов.

Включения в стальной матрице вызывают появление коррозионных микроэлементов, что усиливает степень электрохимической микрогетерогенности поверхности металла. Известно, что неметаллические включения являются катодами по отношению к стальной матрице [9]. Опытным путем для разных типов сталей установлено, что по величине значений разностей электродных потенциалов $\Delta\varphi$, они располагаются в убывающий ряд: сульфиды $(Fe, Mn)S$, $FeS-MnS$, корунд и шпинели Al_2O_3 , $MgO \cdot Al_2O_3$, $MnO \cdot Al_2O_3$, $(Mn, Mg)O \cdot Cr_2O_3$, силикаты SiO_2 , $MnO \cdot SiO_2$, $FeO \cdot SiO_2$, карбонитрид титана TiCN [4–6]. В таком же порядке, но в возрастающий ряд, располагаются включения по величине удельного электросопротивления [4–6]. Металлографические

исследования сталей опытных плавок после испытаний на малоцикловую усталость в различных средах показали, что коррозионные повреждения зарождались на включениях всех видов. Практически всегда развитие коррозии начинается на межфазных границах включение-матрица, а затем распространяется в стальную матрицу и включение. Межфазные границы включение-матрица, а также внутренние межфазные границы в гетерофазных включениях, являются готовыми «каналами» для проникновения атомов поверхностно активного вещества из окружающей среды [4–6].

Результаты исследований (см. табл. 1) позволили условно разделить неметаллические включения в стали С72Д на две группы. В первую группу входят сульфидные включения (Fe, Mn)S, FeS-MnS, для которых коэффициент влияния среды β_c в 5 %-ом водном растворе NaCl составляет 1,77, а в 1 %-ом водном растворе H_2SO_4 – 2,66. Во вторую группу входят все остальные включения, а именно корунд и шпинели Al_2O_3 , $MgO \cdot Al_2O_3$, $MnO \cdot Al_2O_3$, силикаты SiO_2 , $MnO \cdot SiO_2$, $FeO \cdot SiO_2$, для которых величина β_c в среде 5 %-ого водного раствора NaCl составляет 1,42–1,46, а в среде 1 %-ого водного раствора H_2SO_4 – 1,54–1,57. Для разных видов включений существуют такие равные условия, как их содержание в стали, наличие межфазных границ включение-матрица, протекание адсорбционных процессов, а также различия в электропроводности и полупроводниковых свойствах включений, определяющие установленную выше последовательность степеней вредного влияния включений на зарождение коррозии. В то же время следует учитывать фактор, связанный с наличием термических напряжений, причем напряжений определенного знака вблизи включений [4–6, 10]. В работе [3] показано влияние сжимающих напряжений на подавление адсорбционного эффекта, в то же время остаточные растягивающие напряжения усиливают адсорбционные и коррозионные усталостные явления, то есть, суммируясь с действующими (внешними) циклическими растягивающими напряжениями, растягивающие напряжения вблизи включений значительно повышают число «активных» ультрамикротрещин в стали. Расчеты и исследования термических напряжений показали [4–6], что только вблизи сульфидов они являются растягивающими, вблизи остальных изучаемых в данной работе включений – сжимающими.

Поскольку разрушение сталей вследствие коррозионного растрескивания наиболее опасно, так как оно происходит внезапно (без заметной пластической деформации), были проведены исследования по влиянию неметаллических включений на механические свойства опытных плавок стали С72Д в активных средах. Скоростные испытания с целью определения склонности к коррозионному растрескиванию показали, что механические свойства стали С72Д зависели от вида включений при испытаниях на воздухе (табл. 2).

Испытания в коррозионных средах привели к перераспределению относительного влияния вида включений на механические свойства стали. Временное

Таблица 2

Механические свойства стали С72Д с разными видами включений после испытаний на растяжение в различных средах

Среда	Номер плавки; вид включения	Свойства			
		S_k , МПа	σ_B , МПа	δ_{10} , %	ψ , %
Воздух	№ 1; (Fe, Mn)S, FeS-MnS	1089	1110	11,5	28,4
	№ 2; Al_2O_3 , $MgO \cdot Al_2O_3$, $MnO \cdot Al_2O_3$	1067	1056	10,1	27,2
	№ 3; SiO_2 , $MnO \cdot SiO_2$, $FeO \cdot SiO_2$	1092	1078	10,6	28,7
5%-ный водный раствор NaCl	№ 1; (Fe, Mn)S, FeS-MnS	984	1062	9,1	25,6
	№ 2; Al_2O_3 , $MgO \cdot Al_2O_3$, $MnO \cdot Al_2O_3$	1049	1043	9,5	26,6
	№ 3; SiO_2 , $MnO \cdot SiO_2$, $FeO \cdot SiO_2$	1049	1071	9,8	26,1
1%-ный водный раствор H_2SO_4	№ 1; (Fe, Mn)S, FeS-MnS	934	1012	7,8	22,4
	№ 2; Al_2O_3 , $MgO \cdot Al_2O_3$, $MnO \cdot Al_2O_3$	956	1021	8,4	23,9
	№ 3; SiO_2 , $MnO \cdot SiO_2$, $FeO \cdot SiO_2$	1002	1039	8,6	25,5

сопротивление разрыву (σ_B), сопротивление отрыву (S_k), характеристики пластичности (δ ; ψ) наиболее существенно уменьшились для плавки № 1 с сульфидами, для плавок с другими видами включений это снижение являлось менее значительным. При этом четко прослеживается убывающий ряд по влиянию вида включений на механические свойства стали (с учетом присутствия гетерофазных включений): оксисульфосиликаты, сульфиды (Fe, Mn)S, FeS-MnS → корунд и шпинели Al_2O_3 , $MgO \cdot Al_2O_3$, $MnO \cdot Al_2O_3$ → оксисиликаты, силикаты SiO_2 , $MnO \cdot SiO_2$, $FeO \cdot SiO_2$, что соответствует результатам, приведенным выше, при оценке влияния включений на долговечность стали С72Д при малоцикловой усталости.

Известно, что основным критерием влияния окружающей среды на усталостную прочность сталей служит предел усталости, определяемый в различных средах. В качестве показателя, характеризующего влияние среды, принят коэффициент циклической прочности β (табл. 3), представляющий собой отношение предела усталости, определенного при испытаниях в коррозионной среде, к пределу усталости, полученному при испытаниях на воздухе. При испытаниях на воздухе величина предела усталости стали С72Д определяется видом включений (при одинаковом их содержании в плавке): самый высокий предел усталости у плавок с сульфидами, затем он снижается у плавок с силикатами и самое низкое значение σ_{-1} имеет плавка, содержащая оксидные включения.

Таблица 3

Значения предела усталости (σ_{-1}) и коэффициента циклической прочности (β) стали С72Д с различными видами включений

Среда	Номер плавки; вид включения	Показатели циклической прочности	
		σ_{-1} , МПа	β
Воздух	№ 1; (Fe, Mn)S, FeS-MnS	489	1
	№ 2; Al_2O_3 , $MgO \cdot Al_2O_3$, $MnO \cdot Al_2O_3$	347	1
	№ 3; SiO_2 , $MnO \cdot SiO_2$, $FeO \cdot SiO_2$	476	1
5%-ный водный раствор NaCl	№ 1; (Fe, Mn)S, FeS-MnS	392	0,80
	№ 2; Al_2O_3 , $MgO \cdot Al_2O_3$, $MnO \cdot Al_2O_3$	319	0,92
	№ 3; SiO_2 , $MnO \cdot SiO_2$, $FeO \cdot SiO_2$	423	0,89
1%-ный водный раствор H_2SO_4	№ 1; (Fe, Mn)S, FeS-MnS	327	0,67
	№ 2; Al_2O_3 , $MgO \cdot Al_2O_3$, $MnO \cdot Al_2O_3$	294	0,85
	№ 3; SiO_2 , $MnO \cdot SiO_2$, $FeO \cdot SiO_2$	447	0,94

Для воздушной атмосферы величина коэффициента циклической прочности β для всех плавок равна 1.

Испытания в коррозионных средах привели к уменьшению величины предела усталости стали опытных плавок. При испытаниях в 5 %-ом водном растворе NaCl наиболее сильное снижение предела усталости наблюдается у плавки с сульфидными включениями, которые оказывают наиболее значимое воздействие по вредному влиянию коррозионной среды на уменьшение предела усталости исследуемой стали. Результаты исследований подтвержаются изменением значений коэффициента циклической прочности (β) стали С72Д с различными видами включений (см. табл. 3). Следовательно, произошло перераспределение неметаллических включений по

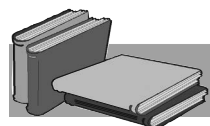
степени их вредного влияния на усталость стали, поскольку прослеживается следующая тенденция к образованию убывающего ряда по степени влияния включения на предел усталости стали С72Д (с учетом гетерофазных включений): оксисульфосиликаты, сульфиды (Fe, Mn)S, FeS-MnS $\rightarrow$ корунд и шпинели (Al_2O_3 , $MgO \cdot Al_2O_3$, $MnO \cdot Al_2O_3$) $\rightarrow$ оксисиликаты, силикаты SiO_2 , $MnO \cdot SiO_2$, $FeO \cdot SiO_2$. Указанные закономерности еще более ярко выражены при испытаниях в 1 %-ом водном растворе H_2SO_4 .

Таким образом, по результатам испытаний стали С72Д на усталостную прочность в коррозионных средах следует выделить наиболее сильное влияние сульфидных включений, что согласуется с результатами, полученными при оценке влияния неметаллических включений на долговечность некоторых других сталей при малоциклового усталости [4–6, 11].

Выводы

Исследована и показана активная роль неметаллических включений в развитии усталостно-коррозионного износа стали С72Д. Коррозионная активность неметаллических включений в стали С72Д определяется знаком термических напряжений, а также существенной ролью межфазных границ включение-матрица и внутренних межфазных границ в гетерофазных включениях.

Установлено влияние неметаллических включений на механические свойства и малоцикловую долговечность в активных средах стали С72Д. Установлен последовательный убывающий ряд, демонстрирующий степень вредного влияния включений на зарождение и развитие коррозионных повреждений в стали С72Д: оксисульфосиликаты, сульфиды (Fe, Mn)S, FeS-MnS $\rightarrow$ корунд и шпинели (Al_2O_3 , $MgO \cdot Al_2O_3$, $MnO \cdot Al_2O_3$) $\rightarrow$ оксисиликаты, силикаты SiO_2 , $MnO \cdot SiO_2$, $FeO \cdot SiO_2$. Обосновано наиболее вредное влияние сульфидных и гетерофазных включений на зарождение и развитие коррозионных повреждений в процессе эксплуатации стальных канатов в различных средах.

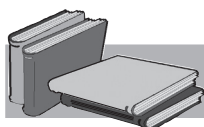


ЛИТЕРАТУРА

1. Карпенко Г.В., Василенко И.И. Коррозионное растрескивание сталей. – Киев: Техника, 1971. – 191 с.
2. Карпенко Г.В. Прочность стали в коррозионной среде. – Москва: МАШГИЗ, 1963. – 187 с.
3. Лихтман В.И., Щукин Е.Д., Ребиндер П.А. Физико-химическая механика материалов. – Москва: АН СССР, 1962. – 303 с.
4. Губенко С.И., Ошкадеров С.П. Неметаллические включения в стали. – Киев: Наукова думка, 2016. – 528 с.
5. Губенко С.И. Неметаллические включения и прочность сталей. Физические основы прочности сталей. – Германия, Саарбрюкен (Saarbrücken): LAP LAMBERT. Palmarium academic publishing, 2015. – 476 с.
6. Губенко С.И. Межфазные границы включение-матрица в сталях. Межфазные границы неметаллическое включение-матрица и свойства сталей. – Германия, Germany-Mauritius: Beau Bassin. Palmarium academic publishing, 2017. – 506 с.
7. Gubenko S.I., Sychkov A.B., Parusov E.V., Denisenko A.I., Zavalishchin A.N. Corrosive damage close to nonmetallic inclusions in bearing steels // *Steel in Translation*. – 2018. – Vol. 48. – № 3. – С. 197–201.
8. Губенко С.И. Возможности трансформации неметаллических включений и межфазных границ включение-матрица при высокоэнергетических обработках сталей // *Металлофизика и новейшие технологии*. – 2014. – № 3 (36). – С. 287–315.
9. Куслицкий А.Б. Неметаллические включения и усталость стали. – Киев: Техника, 1976. – 128 с.

10. Gubenko S.I., Galkin A.M. On the nature of red brittleness of steel // *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*. – 1984. – № 10. – С. 11–15.
11. Губенко С.И., Иванов И.А., Кононов Д.П. Влияние качества стали на усталостную прочность цельнокатанных колес // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. – 2018. – № 3 (84). – С. 52–60.

Поступила 29.10.2018



REFERENCES

1. Karpenko, G.V., Vasilenko, I.I. (1971). Steel corrosion cracking. Kyiv: Tekhnika, 191 p. [in Russian].
2. Karpenko, G.V. (1963). Steel strength in corrosive environment. Moscow: MASHGIZ, 187 p. [in Russian].
3. Likhtman, V.I., Shchukin, E.D., Rebinder, P.A. (1962). Physico-chemical mechanics of materials. Moscow: AN SSSR, 303 p. [in Russian].
4. Gubenko, S.I., Oshkaderov, S.P. (2016). Non-metallic inclusions in steel. Kyiv: Naukova dumka, 528 p. [in Russian].
5. Gubenko, S.I. (2015). Non-metallic inclusions and strength of steel. Physical basis of the strength of steel. Germany, (Saarbrücken): LAP LAMBERT. Palmarium academic publishing, 476 p. [in Russian].
6. Gubenko, S.I. (2017). Interphase boundaries inclusion matrix in steels. Interphase boundaries non-metallic inclusion matrix and properties of steels. Germany, Germany-Mauritius: Beau Bassin. Palmarium academic publishing, 506 p. [in Russian].
7. Gubenko, S.I., Sychkov, A.B., Parusov, E.V., Denisenko, A.I., Zavalishchin, A.N. (2018). Corrosive damage close to nonmetallic inclusions in bearing steels. *Steel in Translation*, Vol. 48, no. 3, pp. 197–201 [in English].
8. Gubenko, S.I. (2014). The possibilities of transformation of non-metallic inclusions and interphase boundaries of the inclusion-matrix during high-energy treatments of steels. *Metallofizika i noveishie tekhnologii*, no. 3 (36), pp. 287–315 [in Russian].
9. Kuslitskii, A.B. (1976). Non-metallic inclusions and steel fatigue. Kyiv: Tekhnika, 128 p. [in Russian].
10. Gubenko, S.I., Galkin, A.M. (1984). On the nature of red brittleness of steel. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, no. 10, pp. 11–15 [in English].
11. Gubenko, S.I., Ivanov, I.A., Kononov, D.P. (2018). Effect of steel quality on the fatigue strength of solid wheels. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*, no. 3 (84), pp. 52–60 [in Russian].

Received 29.10.2018

Анотація

С.І. Губенко¹, д-р техн. наук, проф. кафедри, e-mail: sigubenko@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5427-1154>; **Е.В. Парусов**², канд. техн. наук, ст. наук. співр., зав. відділу, e-mail: tometal@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-4560-2043>; **О.В. Парусов**², канд. техн. наук, ст. наук. співр., e-mail: termet@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-9879-6179>; **І.М. Чуйко**², канд. техн. наук, ст. наук. співр., e-mail: ferrosplav@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-4753-614X>

¹Національна металургійна академія України, м. Дніпро, Україна

²Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, м. Дніпро, Україна

Особенности влияния неметаллических включений на механические свойства та малоцикловую долговечность стальных канатов при эксплуатации в агрессивных средах

Встановлено вплив неметалевих включень на механічні властивості та малоциклову довговічність сталі С72D (EN 16120-2:2011) в агресивних середовищах. Встановлено і обґрунтовано послідовний спадний ряд неметалевих включень, який характеризує ступінь їх шкідливого впливу на зародження і розвиток корозійних пошкоджень дрітків зовнішнього шару сталевих канатів зі сталі С72D. Обґрунтовано найшкідливіший вплив сульфідних і гетерофазних включень на зародження і розвиток корозійних пошкоджень в процесі експлуатації сталевих канатів в різних середовищах.

Ключевые слова

Неметалеві включення, сталевий канат, високовуглецева сталь, малоциклова довговічність, механічні властивості.

S.I. Gubenko¹, Doctor of Engineering Sciences, Professor at the Department, e-mail: sigubenko@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5427-1154>; **E.V. Parusov**², Candidate of Engineering Sciences, Senior Researcher, Head of the Department, e-mail: tometal@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-4560-2043>; **O.V. Parusov**², Candidate of Engineering Sciences, Senior Researcher, e-mail: termet@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-9879-6179>; **I.N. Chuiko**², Candidate of Engineering Sciences, Senior Researcher, e-mail: ferrosplav@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-4753-614X>

¹*The National Metallurgical Academy of Ukraine, Dnipro, Ukraine*

²*Iron and Steel Institute named after Z.I. Nekrasov of NAS of Ukraine, Dnipro, Ukraine*

Specifics of the effect of non-metallic inclusions on mechanical properties and low-cyclic durability of steel ropes during operation in aggressive environment

The influence of non-metallic inclusions on the mechanical properties and low-cycle durability of steel C72D (EN 16120-2:2011) in corrosive environments has been established. A consistent decreasing series of non-metallic inclusions is established and substantiated, which characterizes the degree of their harmful influence on the nucleation and development of corrosion damage to the wires of the outer layer of steel ropes made of steel C72D. The most harmful effect of sulphide and heterophase inclusions on the nucleation and development of corrosion damage during the operation of steel ropes cables in various environments has been substantiated.

Keywords

Non-metallic inclusions, steel rope, high carbon steel, low-cycle durability, mechanical properties.

А.Г. Ковальчук, ассистент, e-mail: agk07091990@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-5503-3633>

М.М. Ямшинский, канд. техн. наук, доц., e-mail: yamshinskiy@iff.kpi.ua, <http://orcid.org/0000-0002-2293-2939>

Г.Е. Федоров, канд. техн. наук, доц., e-mail: radaiff@iff.kpi.ua, <http://orcid.org/0000-0001-8254-9643>

Национальный технический университет Украины «КПИ им. Игоря Сикорского», г. Киев, Украина

Физико-химические процессы в отливках при износостойком легировании поверхности

Авторами работы исследованы процессы износостойкого поверхностного легирования с использованием ферросплавов, в состав которых входят карбидообразующие элементы. Такие исследования дали положительные результаты и подтвердили целесообразность использования ферромарганца и феррохрома в качестве наполнителей легирующих покрытий.

Поверхностное легирование позволяет существенно повысить износостойкость отливок в результате управления процессами структурообразования в поверхностном слое.

Для получения легированного слоя необходимой толщины перспективными могут быть ферросплавы, температуры плавления которых максимально приближаются к температурам заливаемого в форму расплава или ниже их. Наилучшими и самыми дешевыми материалами для получения отливок с дифференцированными свойствами поверхности являются порошки ферросплавов или их механические смеси.

Для достижения высокой поверхностной твердости и износостойкости литых деталей перспективными могут быть способы производства отливок из нелегированных сплавов на основе железа с поверхностным композиционным или легированным слоем, образующимся во время формирования отливки в литейной форме. Гранулометрический состав компонентов легирующего покрытия существенно влияет на толщину легированного слоя и выбирается в зависимости от температуры плавления покрытия и возможного перегрева металла основы перед его заливкой в форму.

Ключевые слова: покрытие, легированные слои, ферромарганец, феррохром, износостойкость, структура, карбиды марганца, поверхностное легирование.

К деталям современных машин и механизмов, работающих в экстремальных условиях, предъявляют повышенные требования относительно механических и специальных свойств – твердости, износостойкости, коррозионной стойкости, стойкости против эрозии в различных агрессивных средах и др. Большинство таких деталей изготавливают с использованием литых заготовок, то есть отливок. Срок службы литых деталей в значительной степени определяет надежность машин и их производительность.

Для достижения высоких поверхностной прочности и износостойкости литых деталей в машиностроении используют различные виды обработки: химико-термическую, лазерную и др., а также электрохимические покрытия и специальные наплавки. Однако первыми методами не удается получить слой с нужными свойствами толщиной более 0,5 мм, что явно недостаточно, особенно для крупных деталей [1–3]. Наплавлением на поверхности детали можно получить слой значительной толщины, однако этот процесс трудоемкий, дорогой и, кроме того, технологически неудобный – на некоторых поверхностях деталей наплавление осуществить практически невозможно.

Установлено, что технологии изготовления отливок с использованием объемного легирования сплавов далеко не всегда себя оправдывают, а во многих случаях экономически не выгодны, поскольку лишь небольшая толщина таких деталей изнашивается или окисляется вследствие внешних воздействий, что приводит к неоправданным расходам дорогих

легирующих элементов в составе высоколегированных сплавов.

Перспективным направлением развития технологии получения отливок с дифференцированными свойствами является поверхностное легирование, которое заключается в применении красок и паст, наносимых на поверхность литейной формы перед заливкой ее углеродистым расплавом.

Поверхностное легирование позволяет существенно повысить, например, износостойкость отливок в результате управления процессами структурообразования в поверхностном слое [1, 2].

Авторами [1] исследованы процессы износостойкого поверхностного легирования с использованием некоторых ферросплавов, в состав которых входят карбидообразующие элементы. Такие исследования дали положительные результаты и подтвердили целесообразность использования ферросплавов в качестве наполнителей легирующих покрытий. Это позволило продолжить исследования в этом направлении [4–6].

Для достижения легированного слоя необходимой толщины перспективными могут быть ферросплавы, температуры плавления которых максимально приближаются к температурам заливаемого в форму расплава или ниже их. Для поверхностного износостойкого легирования – это чистый марганец, ферромарганец или ферротитан различных фракций.

Гранулометрический состав компонентов легирующего покрытия существенно влияет на толщину легированного слоя и выбирается в зависимости от темпе-

ратуры плавления покрытия и возможного перегрева металла основы перед его заливкой в форму.

В качестве связующего компонента в работе использовали жидкое стекло плотностью $1,3 \text{ г/см}^3$ в количестве 3–6 %. Количество связующего компонента зависит от гранулометрического состава наполнителя: чем мельче наполнитель, тем больше используется жидкого стекла.

Изучено влияние карбидообразующих элементов, входящих в состав сравнительно дешевых ферросплавов, на процессы поверхностного легирования отливок в литейной форме.

В качестве основы будущих отливок – среднеуглеродистая сталь 30Л. Температура заливаемой в форму стали составляла $1600 \pm 10^\circ\text{C}$.

Теоретический и практический интерес представляют исследование кривых охлаждения недорогих ферросплавов с целью определить возможность их использования для поверхностного легирования. Для эксперимента выбран стержень, на который нанесли покрытие толщиной 5 мм. Термомпары ВР 5/20 с кварцевыми наконечниками устанавливали в точках, указанных на рис. 1. Результаты исследований показаны на рис. 2.

Анализом кривых охлаждения установлено, что использование данных ферросплавов целесообразно для поверхностного легирования. Для всех компонентов очевидно их расплавление под действием температуры расплава, поскольку их температуры плавления значительно ниже температуры плавления железа. Расплавление легирующих покрытий подтверждено визуальным анализом полученных образцов. В соответствии с содержанием углерода температура плавления ферромарганца – 1200°C для ФМн78 и 1240°C для ФМн1,5. Аналогичная ситуация и с феррохромом: 1580°C – ФХ800 и 1620°C – ФХ015. Анализ кривых охлаждения подтверждает предыдущие данные авторов работы [8] относительно толщины легированного слоя от материала покрытия в зависимости от температуры плавления покрытия.

Марганец. Теоретический и практический интерес представляют исследования влияния отдельных наполнителей на основе марганца различных фракций на толщину легированного слоя. В качестве наполнителей легирующих покрытий использованы высокоуглеродистый ферромарганец ФМн78, низкоуглеродистый – ФМн1,5 и марганец Мн965. Во всех опытах использовали легирующее покрытие толщиной 3 мм.

Результаты исследований показаны на рис. 3.

С увеличением размеров фракции количество легирующего покрытия, которое не расплавилось, увеличивается, а толщина легированного слоя уменьшается (см. рис. 3).

Таким образом, для полного расплавления легирующего покрытия на основе марганца необходимо повышать температуру расплава до $1620 \pm 10^\circ\text{C}$ и увеличивать скорость заполнения литейной формы для сохранения его теплосодержания.

Установлено, что повышение гранулометрического состава легирующего покрытия способствует уменьшению толщины легированного слоя для всех компонентов. Наилучшие результаты получены после использования ферромарганца ФМн78, несколь-

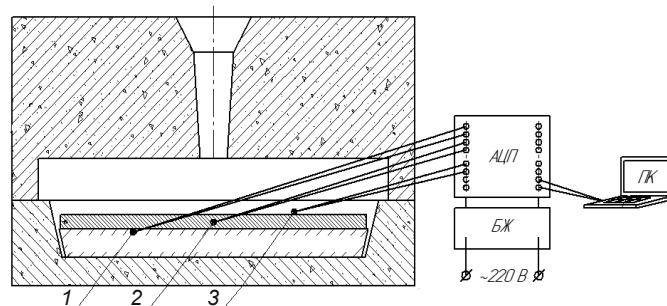


Рис. 1. Схема установки термомпар: 1 – нижняя граница, внизу покрытие – стержень; 2 – середина покрытия; 3 – верхняя граница, покрытие – жидкий металл

ко ниже – марганца Мн965, а наименьшая толщина легированного слоя имеет место при использовании ферромарганца ФМн1,5. Для всех компонентов очевидно их расплавление под действием температуры расплава, поскольку их температуры плавления значительно ниже. Однако теплосодержания жидкого металла не хватает для полного расплавления легирующих покрытий, приготовленных на основе более крупных фракций. Это подтверждено визуальным анализом полученных образцов. Изменение толщины легированного слоя в зависимости от толщины легирующего покрытия при использовании различных компонентов, содержащих марганец, показано на рис. 2. Использовано мелкодисперсную фракцию (0,2) всех компонентов легирующего покрытия.

Установлено, что наибольшую толщину легированного слоя можно получить при использовании высокоуглеродистого ферромарганца ФМн78 в качестве наполнителя легирующего покрытия. При толщине легирующего покрытия 7 мм толщина легированного слоя достигает 12 мм. Это объясняется низкой температурой плавления покрытия (см. рис. 1), что способствует практически полному его расплавлению и смешиванию с металлом основы.

Такой же характер изменения толщины легированного слоя от толщины легирующего покрытия сохраняется и для других компонентов. Однако толщина легированного слоя уменьшается, хотя остается достаточно высокой (10,6 мм для Мн965 и 9,5 мм для ФМн1,5 при толщине покрытия 7 мм). Уменьшение толщины легированного слоя можно объяснить повышением температуры плавления ФМн1,5, а использование марганца Мн965 способствует образованию легированного слоя с большей концентрацией марганца и увеличением переходной зоны вследствие быстрого плавления марганца.

Таким образом, для износостойкого поверхностного легирования с экономической точки зрения целесообразно использовать дешевый высокоуглеродистый ферромарганец ФМн78, который обеспечивает стабильность процесса поверхностного легирования и способствует образованию легированного слоя достаточной толщины. Распределение Mn и Fe показывает, что в легированном слое образовывается достаточное количество карбидов Mn, что подтверждает повышение твердости легированного слоя до

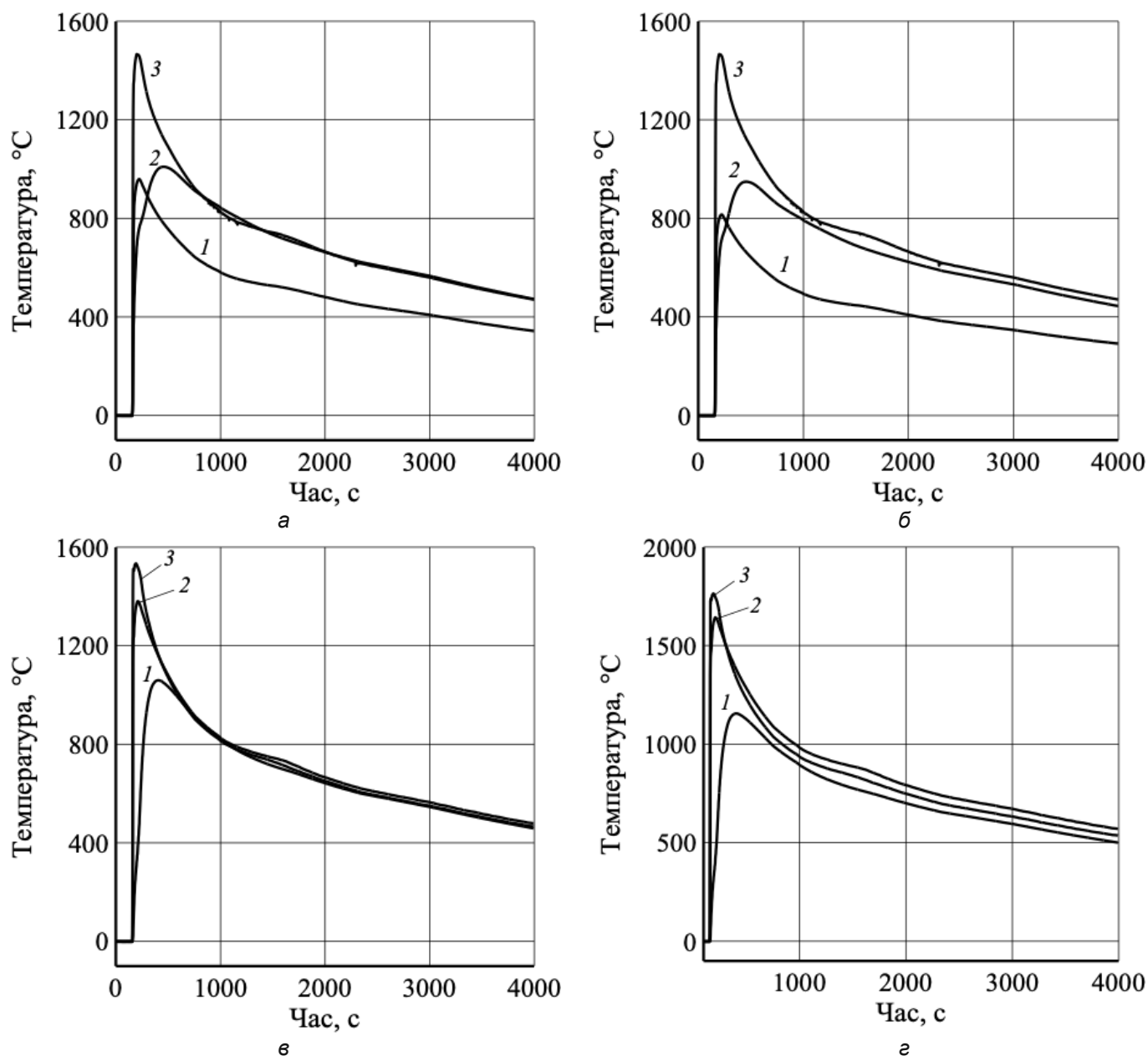


Рис. 2. Кривые охлаждения: а – ФМн78; б – ФМн1,5; в – ФХ800; г – ФХ015: 1 – нижняя граница, внизу покрытие – стержень; 2 – середина покрытия; 3 – верхняя граница, покрытие – жидкий металл

3 мм (рис. 4). Далее в глубине слоя твердость падает вследствие малой диффузии марганца в структуре железа, образуя только твердый раствор, вследствие пропитки жидким металлом.

Поскольку лучшие результаты получены при использовании ферромарганца ФМн78, то практический интерес представляет изменение твердости легированного слоя по его толщине.

Результаты исследования твердости легированного слоя показаны на рис. 4.

Установлено, что максимальная твердость легированного слоя на глубине 2–3 мм достигает 68 HRA после использования ферромарганца фракции 0315 при толщине легирующего покрытия 3 мм. Это почти вдвое больше, чем твердость основного металла. Несколько меньшие значения твердости легированного слоя получены после использования фракций 02 и 04 с такой же толщиной легирующего покрытия и на такой же глубине.

Влияние углерода, который присутствует в ферромарганце, способствует образованию карбидов высокой степени дисперсности, которые препятствуют протеканию процессов рекристаллизации. Также установлено, что марганец обладает диффузией в диапазоне температур 1050–1450 °С

Скорость диффузии марганца увеличивается примерно на 65 % при изменении содержания марганца до 30 % и при повышении содержания углерода до 1,5 %. Изменение скорости диффузии в зависимости от содержания углерода и марганца приблизительно не зависит от температуры. Уравнения диффузии, полученные в работе [9] для 4 и 14 % Мп и 1,25 % С, имеют следующий вид:

$$4\% \text{Mn}; 1,25\% \text{C} \quad D_{\text{Mn}-\text{Fe}} = (0,51 \pm 0,18) \cdot e^{\frac{61200 \pm 1000}{RT}},$$

$$14\% \text{Mn}; 1,25\% \text{C} \quad D_{\text{Mn}-\text{Fe}} = (0,54 \pm 0,18) \cdot e^{\frac{61000 \pm 1000}{RT}}.$$

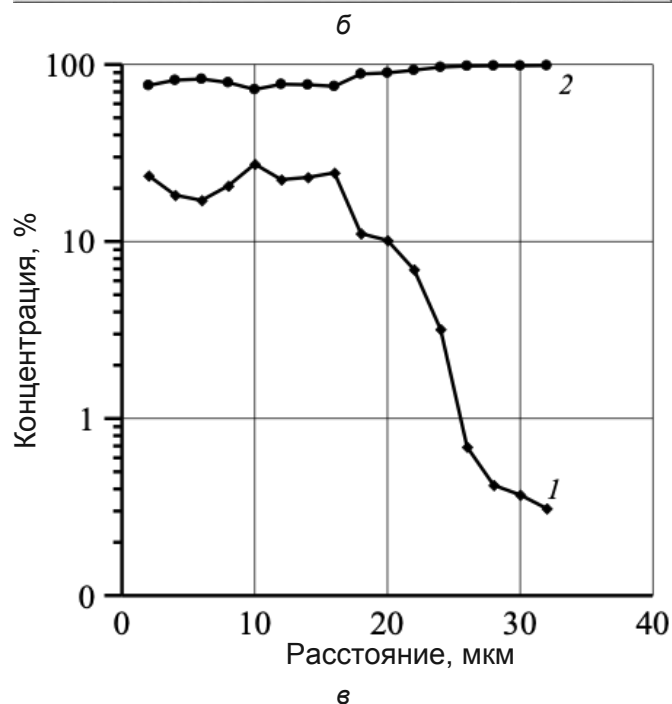
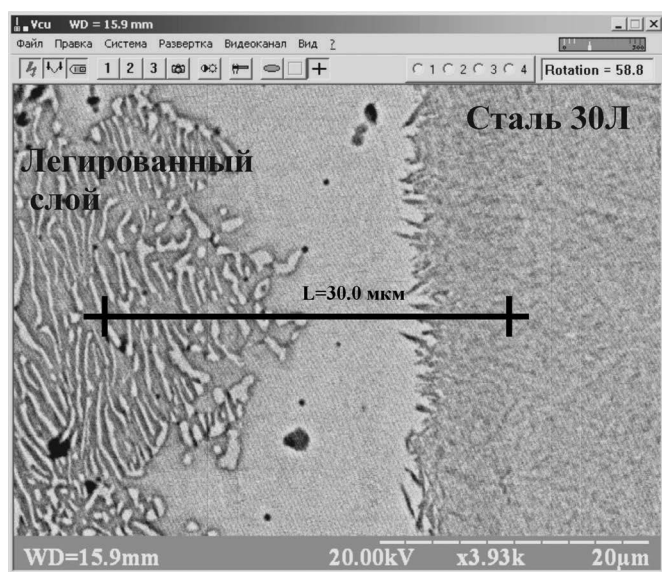
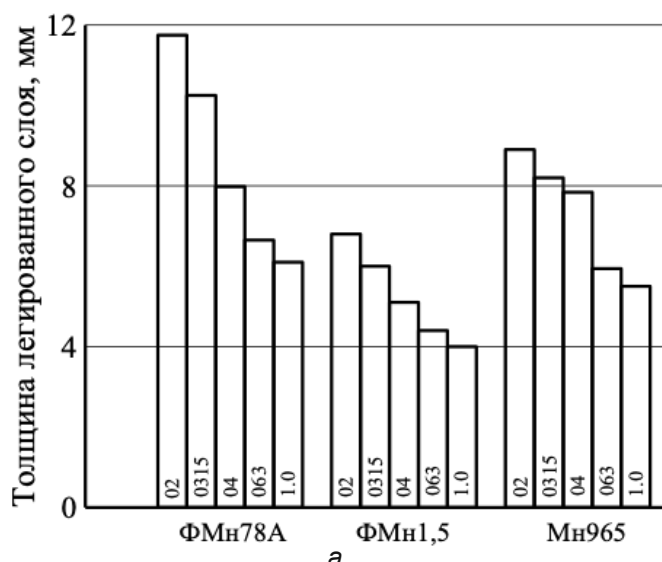


Рис. 3. Изменение толщины легированного слоя в зависимости от фракции наполнителя легирующего покрытия (а); структура легированного слоя с использованием ФМн78 (б) распределение марганца в структуре (в); 1 – Mn; 2 – Fe

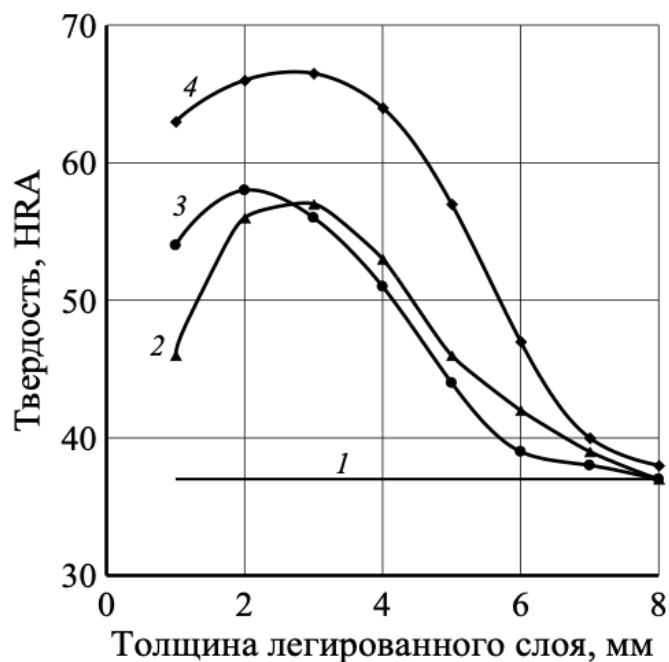


Рис. 4. Изменение твердости легированного слоя по его толщине в зависимости от использованной фракции ФМн78: 1 – твердость основы; 2 – фракция 04; 3 – фракция 02; 4 – фракция 0315

Данные уравнения показывают, что диффузия марганца в железе практически не зависит от температуры и размера зерна.

Влияние марганца на твердость легированного слоя в зависимости от фракции ферромарганца можно объяснить так: при использовании фракции 0315 одновременно осуществляются процессы расплавления легирующего покрытия и проникновения жидкого металла в его капилляры с последующим окончательным расплавлением частичек ферромарганца и образованием карбидов марганца и твердого раствора, что способствует наибольшему повышению твердости легированного слоя.

При использовании фракции 02 осуществляется расплавление легирующего покрытия, начиная с его поверхности (проникновение жидкого металла в покрытие минимальное), поэтому структурообразование сдвигается в сторону увеличения твердого раствора, что и уменьшает твердость поверхностного слоя.

При использовании фракции 04 жидкий металл в большей степени проникает в легирующее покрытие, расплавляет его частично, поэтому твердость поверхности легированного слоя несколько ниже, хотя остается достаточно высокой.

Следовательно, максимальную твердость легированного слоя (без термической обработки) достаточной толщины можно получить после использования высокоуглеродистого ферромарганца ФМн78 фракции 0315 в качестве наполнителя легирующего покрытия толщиной 2–4 мм.

В работе изучена возможность использования механических смесей основных карбидообразующих элементов для поверхностного износостойкого легирования. Содержание компонентов в смесях приведено в табл. 1.

Таблица 1

Механические смеси для легирующих покрытий

Индекс покрытия	Содержание компонентов в смеси, %мас.			
	ФМн78	ФХ800	ФТи30А	электро- дный бой
1	20	49	20	1
2	30	45	16	1
3	40	39	13	1
4	50	34	10	1
5	60	29	7	1

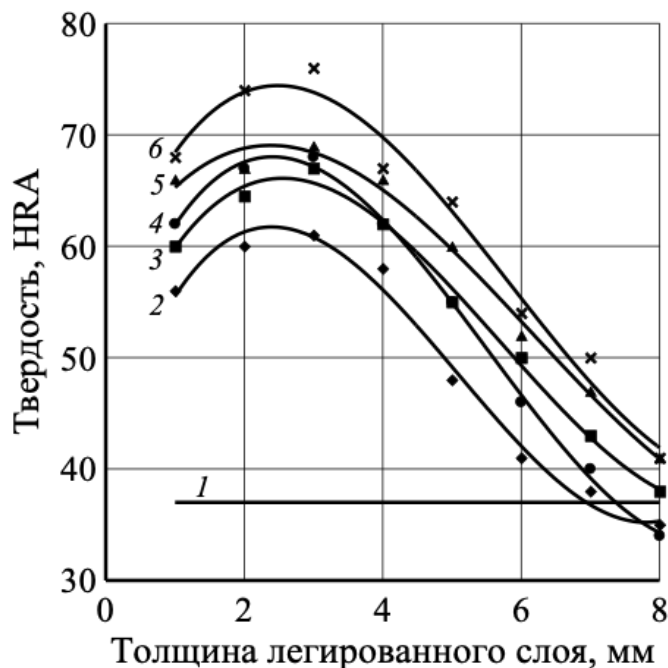
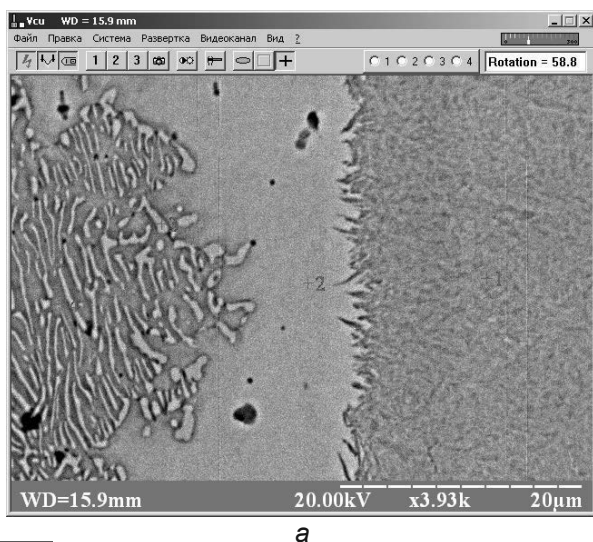


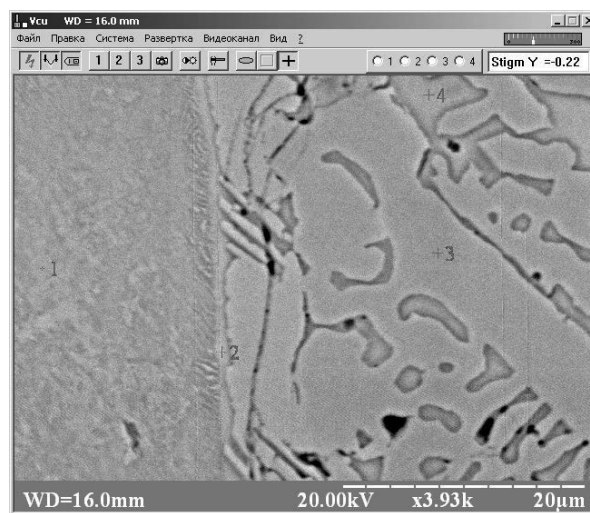
Рис. 5. Влияние механических смесей на образование легирующего слоя и его твердость: 1 – твердость основы; 2 – смесь № 1; 3 – смесь № 2; 4 – смесь № 3; 5 – смесь № 4; 6 – смесь № 5

Во всех опытах использовали покрытие толщиной 3 мм фракции 0315.

Результаты влияния легирующих покрытий на основе механических смесей на толщину легирующего слоя и его твердость показаны на рис. 5.



а



б

Рис. 6. Структура сталей с использованием механической смеси № 1 (а); с использованием механической смеси № 5 (б)

Механические смеси различаются содержанием хрома, марганца, титана, углерода и железа. Исходя из такого соотношения компонентов в смесях, температуры плавления их разные: наивысшая – у покрытия № 1, наименьшая – у покрытия № 5. Этим и объясняются наилучшие результаты, полученные после использования покрытия № 5.

Глубина легирующего слоя зависит преимущественно от начальной глубины проникновения жидкого металла в поры покрытия. Поскольку легирующее покрытие представляет собой достаточно мощный холодильный (особенно толщиной 5–7 мм), то глубина проникновения расплава в поры покрытия в значительной мере будет зависеть от температуры и жидкотекучести металла основы. Поэтому при выборе состава смесей и их фракций необходимо, прежде всего, руководствоваться этими факторами.

Анализом полученных результатов установлено, что для износостойкого поверхностного легирования можно использовать любую из испытанных смесей. Ее выбор зависит от необходимой толщины износостойкого слоя на детали и наличия соответствующей фракции ферросплава.

Научный интерес представляет распределение и остаточное содержание марганца в структуре легирующего слоя. Для исследования были взяты смеси № 1 и № 5. Результаты показаны на рис. 6.

Установлено, что для достижения необходимой твердости и количества карбидов, которые будут способствовать достаточной износостойкости в механической смеси необходимо быть ФМн78 20–25 %.

Химический состав в точках (см. рис. 6) показан в табл. 2.

Такое распределение элементов позволяет, при незначительных затратах и простой технологии, получать отливки с рабочим слоем на уровне стали 110Г13Л. С увеличением содержания марганца в стали повышаются ее твердость, сопротивление разрыву, устойчивость против истирания (11–13 % Mn) и антикоррозионные свойства.

Рентгеноструктурными исследованиями установлено, что содержание карбидной фазы $Mn_{23}C_6$ и Fe_3C в структуре составляет 28 и 72 % соответственно (рис. 7).

Таблица 2

Химический состав в точках к рис. 6

Точка	Химический элемент, %			
	Рис. 6, а		Рис. 6, б	
	Mn	Fe	Mn	Fe
1	0,12	99,4	1,03	97,74
2	8,8	90,9	12,32	86,94
3	22,25	77,67	37,73	60,85
4	15,88	84,02	23,68	75,36

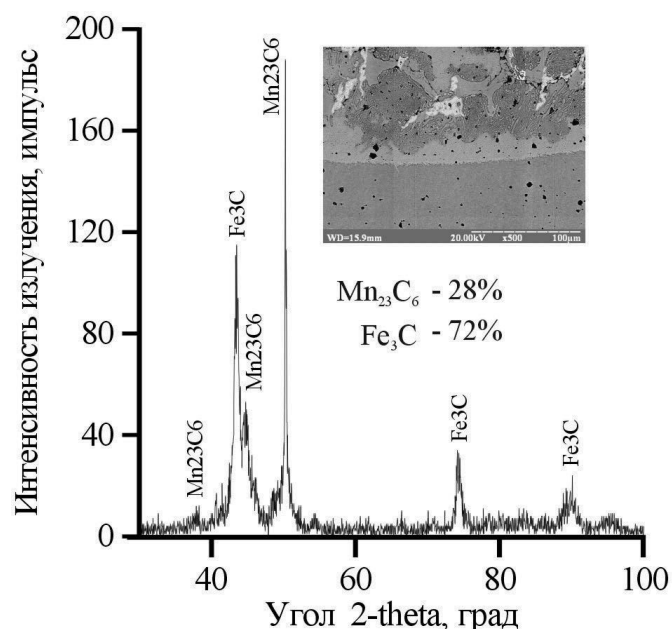


Рис. 7. Дифрактограмма легированного слоя с использованием смеси № 1

Такое количество карбидной фазы в полной мере удовлетворяет правилу Шарпи. Увеличение количества ферромарганца в составе механической смеси приводит к повышению количества карбидной фазы $Mn_{23}C_6$ до 38–40 %, что приводит к повышению твердости легированного слоя, но при этом приводит к выкрашиванию карбидом марганца и ухудшению износостойкости.

Полученные результаты дают право сделать вывод, что толщину легирующего покрытия и его гранулометрический состав необходимо выбирать в зависимости от требуемой толщины износостойкого

легированного слоя с учетом толщины стенки реальных литых деталей.

Таким образом, для износостойкого поверхностного легирования целесообразно использовать порошки ферросплавов, в состав которых входят карбидообразующие элементы, механические смеси на их основе и отдельные химические соединения легирующих элементов.

Исследованиями процессов поверхностного легирования установлена возможность производства литых деталей с дифференцированными свойствами поверхности.

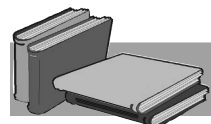
Неметаллические включения являются основной характеристикой, которая определяет все механические свойства сплавов. Это в полной мере относится и к легированному слою. Анализ полученных результатов показывает, что процессы поверхностного легирования не сопровождаются существенным загрязнением металла неметаллическими включениями, а во многих случаях индекс загрязненности легированного слоя значительно ниже, чем металла основы.

Следовательно, для износостойкого поверхностного легирования целесообразно использовать высокоуглеродистый ферромарганец, чистый марганец марки Mn965, механические смеси карбидообразующих элементов или химические соединения легирующих элементов.

Выводы

Таким образом, по результатам выполненной работы можно сделать следующие выводы:

1. Исследованиями процессов поверхностного легирования установлена возможность производства литых деталей с дифференцированными свойствами поверхности.
2. Для износостойкого поверхностного легирования целесообразно использовать порошки ферросплавов, в состав которых входят карбидообразующие элементы, механические смеси на их основе и отдельные химические соединения легирующих элементов.
3. Толщина легированного слоя на поверхности отливок зависит от толщины легирующего покрытия, температуры его плавления, гранулометрического состава и температуры заливаемого в форму металла.

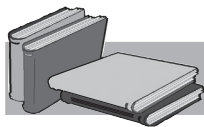


ЛИТЕРАТУРА

1. Ямшинський М.М., Федоров Г.Є. Методи підвищення литих жаростійких деталей // Наукові вісті Національного технічного університету «КПІ». – 2004. – № 4. – С. 98–104.
2. Борщ В.Г. Получение композиционных отливок с качественной поверхностью при использовании металлокерамических оболочек: Автореферат диссертации канд. техн. наук. – Киев: КПИ, 1981. – 20 с.
3. Богачев В.М. Грузин В.Г. Легирование поверхности отливок при затвердевании // Литейное производство. – 1957. – № 5. – С. 29–30.
4. Тихий В.Л. Исследование механизма и разработка технологии процессов поверхностного легирования отливок: Диссертация на соискание ученой степени канд. техн. наук. – Киев: КПИ, 1975.
5. Ямшинський М.М., Федоров Г.Є., Платонов Є.О. Сучасні технологічні аспекти виготовлення виливків із диференційованими властивостями поверхні // Наукові вісті Національного технічного університету «КПІ». – 2004. – № 6. – С. 69–75.

6. Михайлов А.М., Грузин В.Г. Поверхностное легирование фасонных отливок // *Литейное производство*. – 1957. – № 6. – С. 18–20.
7. Ямшинский М.М., Федоров Г.Е., Платонов Е.А. Изготовление отливок с дифференцированными свойствами поверхности // *Металл и литье Украины*. – 2004. – № 12. – С. 22–25.
8. Ковальчук А.Г., Ямшинский М.М., Федоров Г.Е. Исследование процессов износостойкого поверхностного легирования // *Металл и литье Украины*. – 2017. – № 6-7. – С. 28–33.
9. Марганец-железо. URL: <http://metal-archive.ru/marganec/1019-marganec-zhelezo.html>.

Поступила 16.10.2018



REFERENCES

1. Yamshins'kij, M.M., Fedorov, G.E. (2004). Methods of enhancement of cast heat-resistant parts. *Naukovi visti Natsional'nogo tekhnichnogo universitetu "KPI". Naukovi Visti NTUU KPI*, no. 4, pp. 98–104 [in Ukrainian].
2. Borshch, V.G. (1981). Obtaining composite castings with a high-quality surface when using metal-ceramic shells. Extended abstract of candidate's thesis. Kyiv: KPI, 20 p. [in Russian].
3. Bogachev, V.M., Gruzin, V.G. (1957). Doping of the surface of castings during solidification. *Liteinoe proizvodstvo. Foundry*, no. 5, pp. 29–30 [in Russian].
4. Tikhij, V.L. (1975). Investigation of the mechanism and development of technology processes for surface doping of castings. Candidate's thesis. Kyiv: KPI [in Russian].
5. Yamshins'kij, M.M., Fedorov, G.E., Platonov, E.O. (2004). Modern technological aspects of making castings with differentiated surface properties. *Naukovi visti Natsional'nogo tekhnichnogo universitetu "KPI". Naukovi Visti NTUU KPI*, no. 6, pp. 69–75 [in Ukrainian].
6. Mihajlov, A.M., Gruzin, V.G. (1957). Surface alloying of shaped castings. *Liteinoe proizvodstvo. Foundry*, no. 6, pp. 18–20 [in Russian].
7. Yamshinskij, M.M., Fedorov, G.E., Platonov, E.A. (2004). Manufacture of castings with differentiated surface properties. *Metall i lit'e Ukrainy*, no. 12, pp. 22–25 [in Russian].
8. Koval'chuk, A.G., Yamshinskij, M.M., Fedorov, G.E. (2017). Investigation of the processes of wear-resistant surface alloying. *Metall i lit'e Ukrainy*, no. 6–7, pp. 28–33 [in Russian].
9. Manganese-iron. URL: <http://metal-archive.ru/marganec/1019-marganec-zhelezo.html> [in Russian].

Received 16.10.2018

Анотація

О.Г. Ковальчук, асистент, e-mail: agk07091990@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-5503-3633>; **М.М. Ямшинський**, канд. техн. наук, доц., e-mail: yamshinskiy@iff.kpi.ua, <http://orcid.org/0000-0002-2293-2939>; **Г.Є. Федоров**, канд. техн. наук, доц., e-mail: radaiff@iff.kpi.ua, <http://orcid.org/0000-0001-8254-9643>

Національний технічний університет України «КПІ ім. Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна

Фізико-хімічні процеси у виливках при зносостійкому легуванні поверхні

Авторами роботи досліджено процеси зносостійкого поверхневого легування з використанням феросплавів, до складу яких входять карбідоутворювальні елементи. Такі дослідження дали позитивні результати і підтвердили доцільність використання феромарганцю і ферохрому як наповнювачів легувальних покриттів. Поверхневе легування дозволяє суттєво підвищити зносостійкість виливків в результаті управління процесами структуроутворення в поверхневому шарі.

Для одержання легованого шару необхідної товщини перспективними можуть бути феросплави, температури плавлення яких максимально наближаються до температур розплаву, що заливають у форму, або нижче за них. Якнайкращими і найдешевшими матеріалами для отримання виливків з диференційованими властивостями поверхні є порошки феросплавів або їх механічні суміші.

Для досягнення високої поверхневої твердості та зносостійкості литих деталей перспективними можуть бути способи виробництва виливків з нелегованих сплавів на основі заліза з поверхневим композиційним або легуваним шаром, що утворюється під час формування виливків у ливарній формі.

Гранулометричний склад компонентів легувального покриття суттєво впливає на товщину легованого шару і обирається залежно від температури плавлення покриття і можливого перегрівання металу основи перед його заливанням у форму.

Ключові слова

Покриття, легований шар, феромарганець, ферохром, зносостійкість, структура, карбіди марганцю, поверхневе легування.

A.G. Kovalchuk, Assistant, e-mail: agk07091990@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-5503-3633>; **M.M. Yamshinskij**, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, e-mail: yamshinskiy@iff.kpi.ua, <http://orcid.org/0000-0002-2293-2939>; **G.E. Fedorov**, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, e-mail: radaiff@iff.kpi.ua, <http://orcid.org/0000-0001-8254-9643>

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

Physical-chemical processes in castings with wear-resistant surface alloying

The authors investigated the processes of surface alloying with the use of ferroalloys, which include carbide-forming elements. Such studies gave positive results and confirmed the usefulness of applying ferromanganese and ferrochrome as fillers for alloying coatings.

Surface alloying can significantly increase the wear resistance of castings as a result of controlling the processes of structure formation in the surface layer.

In order to achieve an alloyed layer of the required thickness, ferroalloys may be promising, the melting points of which are as close as possible to the temperatures of the melt poured into the mold or below. The best and cheapest materials for producing castings with differentiated surface properties are powders of ferroalloys or their mechanical mixtures.

To achieve high surface hardness and wear resistance of cast parts, methods of producing castings from unalloyed iron-based melts with a surface composite or alloyed layer formed during the formation of a casting in a mold can have a perspective.

The granulometric composition of alloying coating significantly affects the thickness of the alloyed layer and it is chosen depending on the melting temperature of the coating and the possible overheating of the base metal before pouring it into the mold.

Keywords

Coating, alloyed layer, ferromanganese, ferrochrome, wear resistance, structure, manganese carbides, surface alloying.

В.П. Лихошва, д-р техн. наук, проф., зав. отделом

А.П. Шатрава, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., e-mail: shatrava@ptima.kiev.ua

О.А. Пеликан, науч. сотрудник

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

Современные способы производства биметаллических изделий

В статье приведены история и результаты производства и применения биметаллических материалов со времени их изобретения по сегодняшний день. Приведены основные технологические параметры и результаты различных методов их получения – традиционных, таких как прессование, литье, прокатка, сварка взрывом и др. и современных – сварка, наплавка, напыление и др.

В статье показано, что применение биметаллических изделий получает все большее распространение при производстве и восстановлении изношенных деталей в химической, нефтехимической, пищевой и общемашиностроительной промышленности благодаря получению уникальных комплексов свойств: высокой прочности, жаропрочности, коррозионностойкости, электропроводности и теплопроводности, технологичности и др.

Также в статье показано участие ученых и специалистов ФТИМС НАН Украины в разработке традиционных литейных методов получения биметаллов, а также предложены подходы к созданию новых гибридных методов литейно-лазерной обработки для получения биметаллических и многослойных изделий, что позволяет совместить преимущества использования концентрированных источников энергии с традиционными литейными технологиями производства и восстановления деталей машин.

Ключевые слова: биметаллические конструкции, классификация биметаллов, прокатка, центробежное литье, сварка взрывом, лазерная наплавка, литейно-лазерная обработка.

В современной литературе [1–5] понятие биметалл (от би... и металл) определяется как металлический материал, состоящий из двух слоев разнородных металлов или сплавов (например, сталь и алюминий, сталь и ниобий, сталь и медь, сталь и чугун, алюминий и титан, титан и молибден и др.). Применение биметаллических изделий или слоистых композиций получает все большее распространение при производстве и восстановлении изношенных деталей в химической, нефтехимической, пищевой и общемашиностроительной промышленности благодаря получению уникальных комплексов свойств: высокой прочности, жаропрочности, коррозионностойкости, электропроводности, теплопроводности, технологичности и других, которыми не обладают составляющие композиционных материалов по отдельности. При этом композиция может состоять не только из двух, но и из большого количества металлов, обладающих различными характеристиками.

По основному назначению современные биметаллы можно разделить на 3 группы: износостойкие, коррозионностойкие и антифрикционные.

Все разнообразие биметаллов различают также по химическому составу слоев, по форме изделий, по способу получения, по расположению, геометрическим параметрам слоев и др.

Для работы в экстремальных условиях применяют биметаллические материалы, основным слоем которых являются нержавеющие и жаропрочные сплавы, ниобий, тантал и другие тугоплавкие материалы. Однако использование таких дорогих материалов неиз-

бежно сказывается на экономической эффективности их производства.

Первое специализированное предприятие «Биметалл» было основано во Франции в 1890 г., затем стали появляться предприятия в США и Германии. В СССР массовое производство биметаллов началось в 1930-х годах производством биметаллической проволоки (сталь-медь).

По способу образования связи между слоями биметаллы делятся на диффузионные, металлургические и адгезионные.

В работе [2] рассмотрены три сочетания агрегатных состояний металлов в зоне контакта при изготовлении биметаллических изделий: твердый с твердым, твердый с жидким и жидкий с жидким. В работе отмечено, что в последнем случае участок контакта соединяемых металлов доведен до расплавления, а взаимная диффузия и кристаллизация способствуют прочному соединению материалов.

Также, многими авторами [1–6] отмечается, что классификацию биметаллов можно проводить по признаку наличия или отсутствия пластического деформирования соединения. Наиболее распространенными методами получения биметаллов с применением пластической деформации являются: прессование, прокатка, сварка взрывом и др. Для метода без пластической деформации характерны такие процессы, как литье, сварка, наплавка, напыление и другие. Эти данные свидетельствуют о широком спектре способов и технологических приемов, используемых при изготовлении биметаллических изделий (таблица).

Основные способы производства биметаллических изделий

Способы производства биметаллических изделий																			
Механические				Литейные методы				Сварные методы					Наплавка и напыление						
Прессование	Прокатка	Ковка	Штамповка	Литье в ЖС формы	Центробежное	Под давлением	Литье в кокиль	Дуговая	Плазменная	Электрошлаковая	Лазерная	Диффузионная	Взрывом	Вибродуговая	Газовая	Плазменная	Лазерная	Детонационное	Электронно-лучевая

Кроме того, существуют еще такие методы, как волочение, пайка, холодная сварка, ультразвуковая сварка, сварка трением, металлизация напылением и др., однако эти способы применяются гораздо реже.

Прокатку, как наиболее распространенный способ получения биметаллов, используют для производства биметаллических листов, труб, профилей, прутков [5]. Технология горячей прокатки нескольких слоев металла включает в себя подготовку (очистку, травление, промывку, обезжиривание) и сборку компонентов пакета, предварительный нагрев и прокатку, резку, термообработку, правку и отделку.

Для предотвращения окисления прокатываемых слоев применяют различные способы – покрытия, наносимые электролитическим способом, наплавкой или напылением, слои из фольги и пиррофорных веществ. Для обеспечения лучшей адгезии также используют промежуточные слои (предварительное плакирование).

Схемы предварительной укладки биметаллических заготовок в пакеты показаны на рис. 1.

Рулонная прокатка биметаллов является более производительной, чем пакетная и является типичным примером непрерывного автоматизированного процесса (рис. 2).

Одной из главных проблем при прокатке биметаллов является их расслоение [4]. Для уменьшения этого явления применяется прокатка плакирующего слоя из порошка, а также прокатка в профильных валках [5].

Начиная с 60-х годов, в ФТИМС НАН Украины были разработаны литейные способы изготовления биметаллических изделий из различных материалов [5–7]. Из многообразия используемых методов получения биметаллических литых изделий, разработанных этими авторами, можно выделить следующие:

- одновременная или последовательная заливка жидких сплавов в форму с разделительной перегородкой;
- последовательная заливка в форму двух и более жидких сплавов;
- намораживание жидкого металла на твердую заготовку;
- заливка жидкого металла на твердую заготовку, предварительно расположенную в литейной форме или изложнице (рис. 3).

На основании полученных результатов [8] можно утверждать, что определяющим фактором для создания

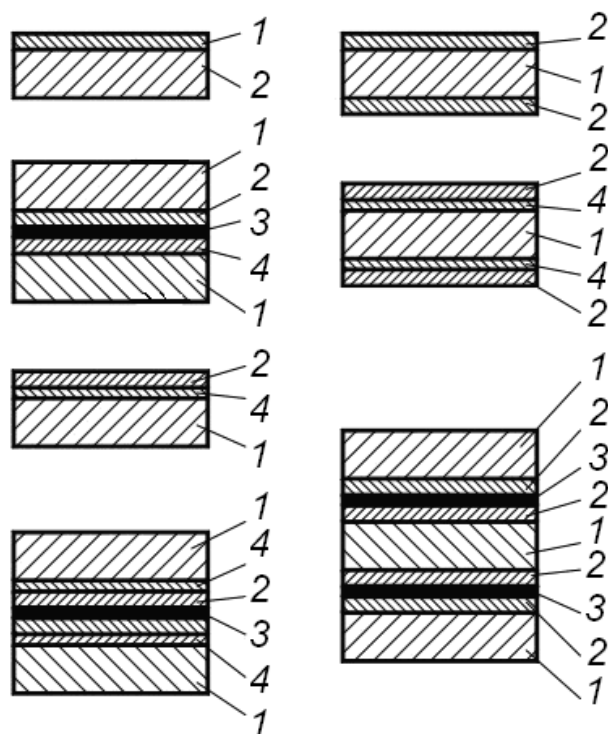


Рис. 1. Схемы укладки биметаллов в пакеты перед совместной прокаткой: 1 – основной слой; 2 – плакирующий слой; 3 – разделительный подслой; 4 – соединительный подслой [1]

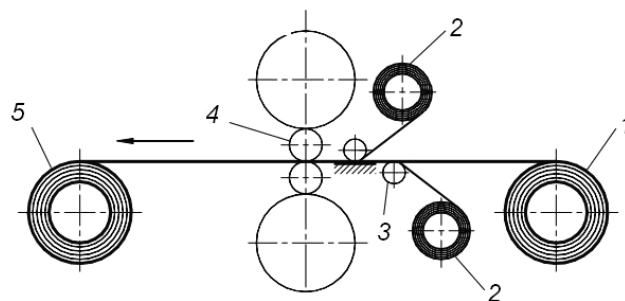


Рис. 2. Рулонная прокатка трехслойного биметалла [3]: 1 – размотчик с рулоном основного слоя; 2 – размотчик с рулоном полосы плакирующего слоя; 3 – направляющие ролики; 4 – рабочие валки прокатного стана; 5 – моталка с рулоном трехслойной полосы

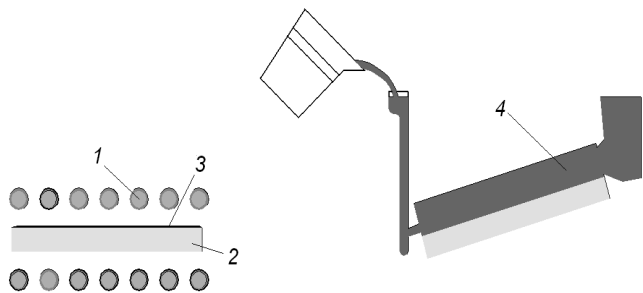


Рис. 3. Схема процесса заливки жидкого металла на твердую заготовку [7]: 1 – индуктор; 2 – стальная заготовка; 3 – защитный флюс; 4 – износостойкий чугун

соединения биметаллов, состоящих из нержавеющей стали и серого чугуна, является массоперенос углерода из одного материала в другой, в отличие от диффузии Fe, Cr или Ni.

Результаты [9] показали, что при получении двухслойных отливок из Al и Cu методом литья жидкого металла на твердую заготовку, происходит образование интерметаллидов Al_2Cu на границе раздела, которые пагубно влияют на прочность соединения биметаллических слоев. Авторы вынуждены были использовать прослойку из Ni-P как диффузионный барьер и защитную пленку, которая эффективно уменьшала образование интерметаллидов в переходном слое.

Цилиндрические заготовки биметаллов получают также методами центробежного литья [10–13]. При этом в полость плакируемой детали расплавленный металл подается через желоб с воронкой, а заготовку подвергают либо предварительному нагреву, либо нагреву непосредственно на центробежной литейной машине газовыми горелками или токами высокой частоты. Схема процесса центробежного литья биметаллических изделий показана на рис. 4.

Разработанная автором работы [11] технология изготовления пальцев гусеничных тракторов прессованием из биметаллических заготовок, полученных методом центробежного литья, позволяет получать качественные длинномерные изделия, износостойкость которых в 2–3 раза выше, чем у серийных.

Технология литья заготовок для цилиндрических гильз центробежным способом [12], которая заключается в последовательной заливке в металлическую форму серого и низколегированного чугуна, позволяет экономить до 70 % легированного чугуна.

При производстве медно-алюминиевого биметалла с использованием центробежного литья авторами работы [13] отмечается, что для создания прочной металлургической связи между двумя металлами очень важно отсутствие примесей и оксидов металлов в месте их соединения.

Метод литья биметаллов является более простым, по сравнению с прокаткой, однако у него существуют свои технологические ограничения: плохая заполняемость металла узких зазоров между изложницей и пластинами, вероятность расплавления металла пластин, невозможность получения композиций из материалов, образующих легкоплавкие фазовые состояния.

Главной особенностью данных технологий является соединение различных металлов с образованием металлургической связи между составными частями. Примерами биметаллических пар служат: сталь углеродистая – сталь нержавеющая; сталь углеродистая – чугун хромистый и др.

Сварка, как эффективный технологический процесс соединения разнородных материалов, получил широкое распространение в исследованиях Института электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины [14]. Среди методов сварки в настоящее время используются такие методы, как сварка плавлением, сварка давлением и пайка, дуговая сварка, диффузионная сварка, сварка взрывом и другие.

Сварка взрывом является производительным и малозатратным методом получения биметаллических деталей [15–18]. Уникальность этого процесса заключается в одновременном создании высокого давления 10 000–50 000 атмосфер и скорости нанесения плакируемого слоя порядка 500–1000 м/с. В зоне контакта происходит упрочнение металла. Сварка взрывом позволяет соединять металлы с разнородными свойствами, при этом без применения специализированного оборудования (рис. 5).

Ее применяют как для получения плоских листовых биметаллических заготовок, так и для цилиндрических обечаек. Однако этот метод имеет и существенные недостатки: несоблюдение режима сварки взрывом может привести к образованию трещин,

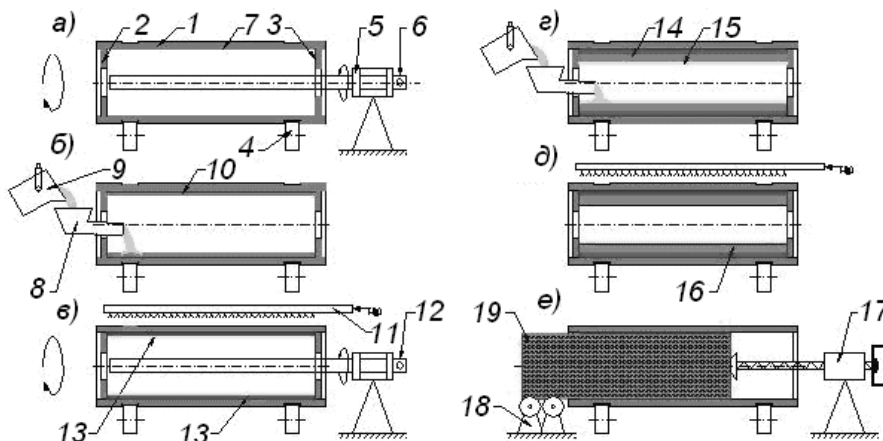


Рис. 4. Схема процесса центробежного литья биметаллических изделий [10]: а – нанесение теплоизолятора; б – заливка рабочего слоя; в – охлаждение и подача флюса; г – заливка внутреннего слоя; д – охлаждение изложницы; е – извлечение заготовки. 1 – изложница; 2 – крышка; 3 – слой теплоизолятора; 4 – опорный ролик; 5 – направляющая стойка; 6 – устройство нанесения теплоизолятора; 7 – слой теплоизолятора; 8 – чаша; 9 – ковш; 10 – расплав рабочего слоя; 11 – устройство охлаждения; 12 – устройство подачи флюса; 13 – пленка флюса; 14 – расплав внутреннего слоя; 15 – пленка жидкого флюса; 16 – внутренний слой; 17 – устройство извлечения заготовки; 18 – приемный ролик; 19 – биметаллическая заготовка

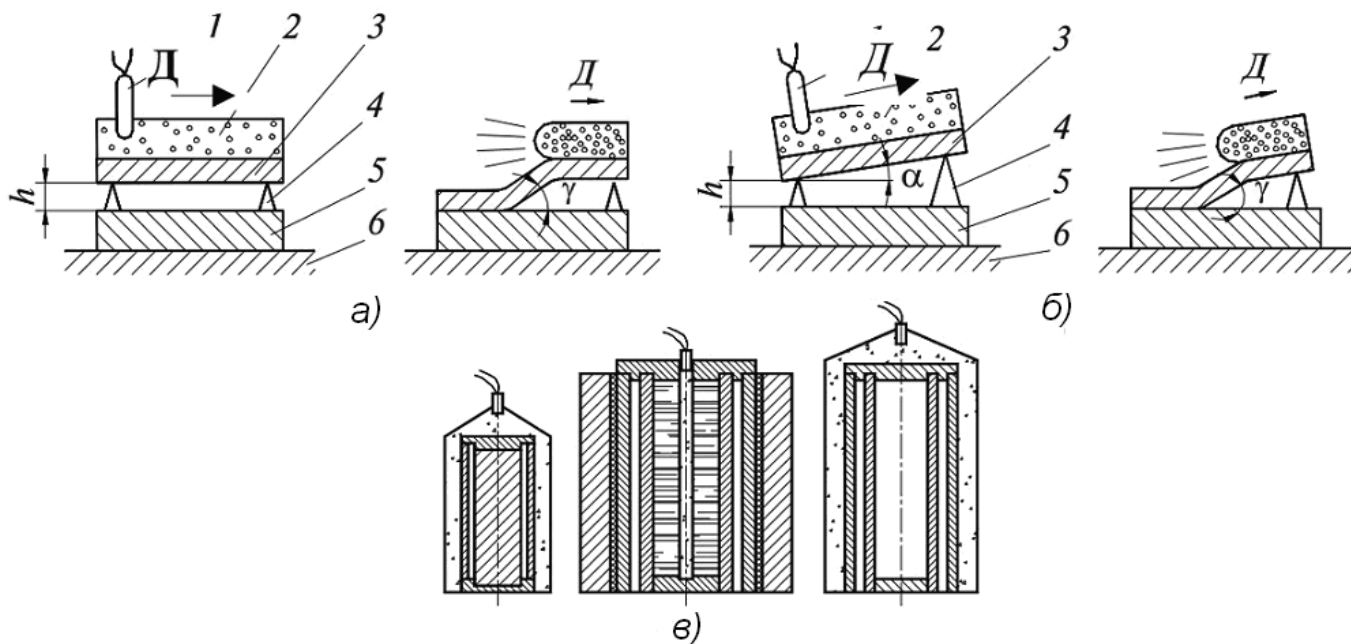


Рис. 5. Сварка биметаллов взрывом [1]: а – параллельная схема сварки; б – угловая схема сварки; в – сварка цилиндрических обечаек. 1 – детонатор; 2 – заряд взрывчатого вещества; 3 – метаемая пластина; 4 – установочный элемент; 5 – основная пластина; 6 – основание

оплавлению в зоне контакта и даже к разрушению биметалла, метод эффективен для толстолистовых материалов и требует рихтовки после проведения основных работ.

Лазерная сварка проплавным швом [19] может рассматриваться как перспективный метод получения биметаллических соединений, поскольку процесс может быть автоматизирован и позволяет соединять металлы различных комбинаций в широком диапазоне толщин. Однако механические свойства соединений после такой сварки неоднородны, поэтому для их уравнивания при необходимости можно применять термическую обработку.

Такие методы получения биметаллов как: напыление, плакирование или осаждение не позволяют получить довольно прочную связь покрытия с основой, да и малая толщина таких покрытий в ряде случаев не пригодна для условий эксплуатации многих изделий.

Наплавка, как метод получения биметаллических и многослойных изделий [20–23], позволяет получать прочную металлургическую связь покрытия с основой, причем локальный характер воздействия на поверхность подложки не приводит к чрезмерному увеличению глубины переходного слоя, а также наплавка позволяет получать многослойные наплавочные покрытия на локальных рабочих участках деталей (рис. 6).

Вопросам лазерной наплавки, как отдельному методу поверхностной обработки, посвящен целый ряд работ отечественных и зарубежных авторов [24–26]. Этот процесс рассматривается многими авторами в качестве технологии для ремонтных работ и восстановления изношенных деталей. Данные исследования носят прикладной характер и основаны на эмпирических зависимостях. Однако в последнее время наметилось более общее рассмотрение процесса лазерной наплавки.

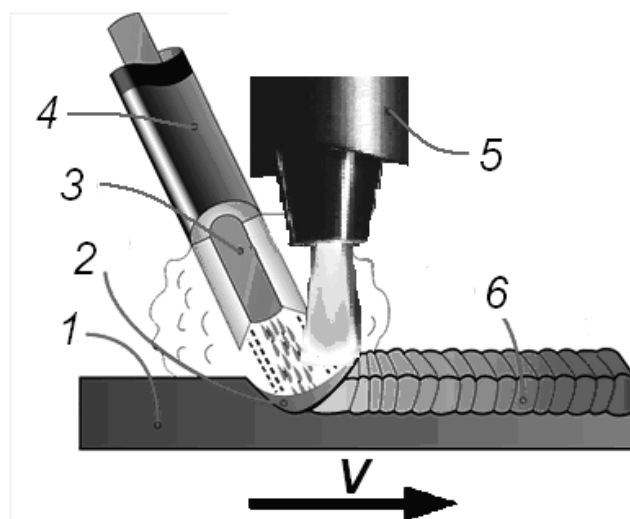


Рис. 6. Метод наплавки, функциональная схема [19]: 1 – подложка; 2 – ванна расплава; 3 – присадочный материал; 4 – система подачи; 5 – источник нагрева; 6 – наплавочный слой

К настоящему времени в ФТИМС НАН Украины разработан ряд технологий для повышения эксплуатационных характеристик и восстановления рабочих поверхностей деталей машин бурового инструмента, двигателей внутреннего сгорания, железнодорожного транспорта и др. с использованием лазерной наплавки. В работах [27–30] впервые предложен способ получения покрытий из композиционных материалов с помощью лазерного излучения на основе железо- и медьсодержащих сплавов, с регулярной структурой типа: твердая матрица – мягкие включения и мягкая матрица – твердые включения (в зависимости от состава композиций). В данных работах представлен

теплофизический механизм и технологические особенности формирования структуры композиционных покрытий на основе нержавеющей стали 9Х18 и бронзы ОЦС 5-8-6 для различных деталей, эксплуатирующихся в экстремальных условиях.

В связи с возрастающими требованиями современной промышленности в необходимости производства деталей, обладающих целым комплексом необходимых эксплуатационных свойств, перед исследователями возникает потребность в поиске и создании комплексных (гибридных) методов получения биметаллов. Поэтому создание технологий получения биметаллических и многослойных изделий с использованием новейших гибридных методов обработки имеют хорошую перспективу.

В развитие ранее разработанных технологий авторами данной работы предусмотрено [31–33] создание новых гибридных методов литейно-лазерной и литейно-плазменной обработки для получения биметаллических и многослойных изделий, что позволяет совместить преимущества использования концентрированных источников энергии с традиционными литейными технологиями производства и восстановления деталей машин (рис. 7).

Данные методы обработки основаны на принципе жидкофазного и жидко-твердофазного соединения с образованием диффузионного или металлургического связующего слоя. Сочетание традиционных приемов литейных технологий с воздействием концентрированных источников энергии позволяет получать соединение тонких пластин со слоями больших размеров в пределах одной технологической операции, а также соединение тугоплавкой основы с более легкоплавким рабочим или защитным слоем.

Метод позволяет получить значительные технические и экономические результаты, из которых наиболее важными являются: увеличение ресурса эксплуатации деталей машин в 2,5–6,0 раз, по сравнению с серий-

ными изделиями, и уменьшение до 70–80 % расходов высоколегированных дорогостоящих материалов.

В качестве объектов исследований выбраны такие композиции: сталь – чугун, сталь – бронза, сталь – алюминий и другие.

При получении биметаллических образцов большое внимание уделяли переходному слою, как наиболее важному элементу биметаллической конструкции. Для серого чугуна и стали переходной слой получался плотным по всей поверхности соединения, состоял из узкого слоя перлита со стороны чугуна и более широкого слоя перлита со стороны стали. Твердость серого чугуна марки СЧ30 в исходном состоянии составляла менее 20 HRC, а после заливки этого чугуна на поверхность стальной заготовки, его твердость повышалась до 30 HRC за счет интенсивного охлаждения. Для повышения свойств рабочего слоя производилось его упрочнение, которое приводило к повышению его твердости до 55 HRC.

Твердость исходного литого хромистого чугуна ЧХ16 составляла 49 HRC. После заливки расплава данного чугуна на заготовку из стали Ст3 происходило снижение его твердости до 40 HRC. После поверхностной закалки существенного повышения твердости залитого слоя хромистого чугуна ЧХ16 не происходило (41 HRC). Для повышения твердости рабочего слоя (хромистого чугуна) проведена объемная закалка, которая привела к повышению твердости до 60–62 HRC.

Соединение жидкой бронзы БрО5Ц5С5 с твердой заготовкой из стали Ст3 и получение биметаллических образцов происходило с получением плотных переходных слоев по всей линии контакта. Структура залитого слоя бронзы аналогична ее структуре в литом состоянии. Однако в процессе формирования биметаллической конструкции наблюдается диспергирование структурных составляющих вследствие повышенной скорости охлаждения металла.

Выводы

В работе показаны наиболее эффективные традиционные способы получения биметаллических и многослойных изделий. Отмечены их преимущества и недостатки.

Обозначены наиболее перспективные современные способы получения биметаллических изделий под действием концентрированных источников энергии.

В работе отмечаются преимущества новейшего гибридного метода жидкофазного или жидко-твердофазного соединения разнородных материалов, который позволяет получать качественные биметаллические конструкции не только на основе железоуглеродистых сплавов (сталь – чугун), но и композиций черных и цветных сплавов (сталь – бронза).

Данный метод также позволяет производить биметаллические изделия поштучно и в непрерывном автоматизированном процессе, что определяет его технологическую гибкость для производства новых или восстановления изношенных деталей.

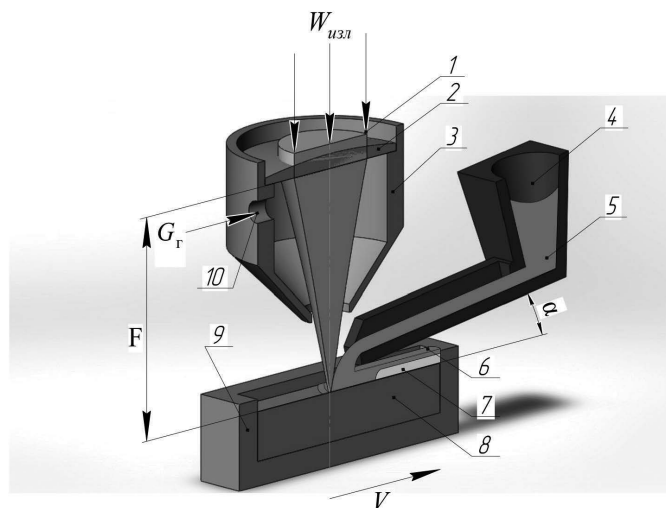
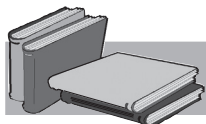


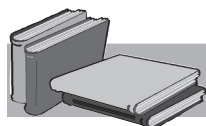
Рис. 7. Схема получения биметаллической конструкции под действием лазерного излучения [31]: 1 – лазерное или плазменное излучение; 2 – фокусирующий элемент; 3 – сопло; 4 – дозирующий лоток; 5 – расплав металла; 6 – слой затвердевающего расплава на поверхности детали; 7 – слой отлитого металла; 8 – заготовка; 9 – ограничители; 10 – отверстие подачи защитного газа



ЛИТЕРАТУРА

1. Скляр В.О. Инновационные и ресурсосберегающие технологии в металлургии. Учебное пособие. – Донецк: ДонНТУ, 2014. – 224 с.
2. Чепурко М.И., Остренко В.Я., Глускин Н.Я. и др. Биметаллические материалы – Л.: Судостроение, 1984. – 272 с.
3. Сиротенко Л.Д., Шлыков Е.С., Абляз Т.Р. Применение биметаллических материалов в машиностроении // (Эл. журнал) *Современные проблемы науки и образования*. – 2015. – № 2. – ч. 1.
4. Король В.К., Гиндельгорн М.С. Основы технологии производства многослойных металлов. – М.: Металлургия, 1970. – 237 с.
5. Вуков А. Bimetal production and applications // *Steel in Translation*. – 2011. – Vol. 41. – Iss. 9. – P. 778–786.
6. Литые биметаллических изделий / Сборник под ред. Снежко А.А. – Киев: ИПЛ АН УССР, 1976. – 122 с.
7. Состояние и перспективы развития биметаллического и многослойного литья / Сборник научных трудов под ред. Г.Д. Костенко. – Киев: ИПЛ АН УССР, 1991. – 126 с.
8. Wrobel T., Szajnar J. Bimetallic casting: ferritic stainless steel – grey cast iron // *Archives of metallurgy and materials*. – 2015. – Vol. 60. – Iss. 3. – pp. 2361–2365.
9. Yuanhu Yi-qing, Chen Lili Huan-dong, Huzi-ang Zhu. Microstructure and properties of Al/Cu bimetal in liquid–solid compound casting process // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. – June 2016. – Vol. 26. – Iss. 6. – P. 1555–1563.
10. Ширяев В.В., Пеликан О.А., Шинский И.О., Глушков Д.В., Романенко Ю.Н. Технологические особенности производства биметаллических (многослойных) отливок повышенной износостойкости // *Металл и литье Украины*. – 2009. – № 7-8. – С. 52–56.
11. Герасимов В.Г. Исследование и разработка технологии центробежного литья длинномерных биметаллических заготовок для пальцев гусеничных тракторов. Автореф. дисс. канд. тех. наук. – Киев: ВНИТИ и ИПЛ АН УССР, 1982. – 22 с.
12. Кривомазов В.А. Разработка и исследование системы автоматизации процесса литья биметаллических тел вращения центробежным способом. Автореф. дисс. канд. тех. наук. – Киев: ИПЛ АН УССР, 1967. – 26 с.
13. Nazari J., Yousefi M., Amiri Kerahroodi M.S., Bahrololoumi Mofrad N.S., Alavi Abhari S.H. Production of Copper-Aluminum Bimetal by Using Centrifugal Casting and Evaluation of Metal Interface // *International Journal of Materials Lifetime*. – 2015. – Vol. 1. – № 1. – P. 20–28.
14. Патон Б.Е. Избранные труды. – Киев: ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины, 2008. – 893 с.
15. Гринберг Б.А., Иванов М.А., Рыбин В.В. и др. Неоднородности поверхности раздела при сварке взрывом // *Физика металлов и металловедение*. – 2012. – т. 113. – № 2. – С. 187–200.
16. Малахов А.Ю., Сайков И.В., Первухин А.Б. Особенности сварки взрывом труб по «обратной» схеме // *Вестник Тамбовского университета*. – 2016. – т. 21. – вып. 3. – С. 1139–1140.
17. Zlobin B.S. Explosion Welding of Steel with Aluminum // *Combustion, Explosion and Shock Waves*. – May 2002. – Vol. 38. – Iss. 3. – P. 374–377.
18. Prazmowski M., Najwer M., Paul H., Andrzejewski D. Influence of explosive welding parameters on properties of bimetal Ti-carbon steel // *MATEC Web Conf. Volume 94, 2017, the 4th International Conference on Computing and Solutions in Manufacturing Engineering*. – 2016. – CoSME'16. – p. 8.
19. Шмидт М., Курынцев С.В. Получение биметаллических заготовок с помощью лазерной сварки проплавным швом // *Автоматическая сварка*. – 2014. – № 4. – С. 47–51.
20. Наплавка. Технологии, материалы, оборудование / Составители: И.А. Рябцев, И.А. Кондратьев, Е.Ф. Переплетчиков, и др. – Киев: ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины, 2015. – 402 с.
21. Соснин Н.А., Ермаков С.А., Тополянский П.А. Плазменные технологии // Руководство для инженеров. – Санкт-Петербург: Изд-во Политехнического ун-та, 2013. – 406 с.
22. Бафаев Д.Х. Плазменная наплавка, упрочнение и выбор способа восстановления деталей машин // *Материалы VI Междунар. науч. конф.* – М.: Буки-Веди, 2016. – С. 65–68.
23. Carr M.L., Rigsbee J.M. Laser processing of plasma-sprayed coatings // *Materials science and Engineering*. – 1984. – Vol. 62. – № 1. – P. 49–56.
24. Блинков И.В., Орехов И.Е. Формирование лазерной наплавкой композиционных материалов и их трибологические свойства // *Изв. Вузов. Черная металлургия*. – № 1. – 1996.
25. Одинцов Н.Н., Штернин Л.А. Повышение производительности и расширение возможностей лазерной наплавки // *Свар. пр-во*. – 1987. – № 2. – С. 1–4.
26. Коваленко В.С., Головки Л.Ф. Упрочнение и легирование деталей машин лучом лазера. – К.: Техніка, 1990. – 191 с.
27. Шатрава А.П. Управление формированием антифрикционных наплавочных слоев из композиционных материалов на основе Fe-Cu при действии лазерного излучения. Автореф. дисс. канд. тех. наук. – Киев: НТУУ КПИ, 2001. – 20 с.
28. Шатрава А.П. Физико-механические характеристики композиционных лазерных покрытий Тез. докл. на конф. мол. ученых и специалистов. – «ЗСТ», 2001 г.
29. Шатрава А.П. Физико-механические характеристики покрытий сталь-бронза, полученных с помощью лазерной наплавки // *Автоматическая сварка*. – 2002. – № 5. – С. 60–61.
30. Найдек В.Л., Лихошва В.П., Шатрава А.П. Триботехнические композиционные покрытия, полученные методом лазерной газопорошковой наплавки // Тез. докл. на между. науч.-тех. конгрессе «Литейное производство в новом веке...». – Киев, 2002 г.
31. Лихошва В.П., Шатрава А.П. Литейно-лазерное жидкофазное соединение разнородных материалов // Тез. докл. на VI междунар. науч.-практ. конф. «Металлургия-2017», Запорожье, 2017. – С. 164–165.
32. Лихошва В.П., Шматко О.В. Безперервний ливарно-плазмовий метод отримання біметалевих та багатопорових конструкцій // Тез. докл. на VI междунар. науч.-практ. конф. «Металлургия-2017», Запорожье, 2017. – С. 165–166.
33. Лихошва В.П., Надашкевич Р.С. Новий прогресивний метод отримання біметалевих і багатопорових виробів // Тез. докл. на VI междунар. науч.-практ. конф. «Металлургия-2017», Запорожье, 2017. – С. 166–168.

Поступила 18.10.2018



REFERENCES

1. Skliar, V.O. (2014). Innovative and resource-saving technologies in metallurgy: textbook. Donetsk: DonNTU, 224 p. [in Russian].
2. Chepurko, M.I., Ostrenko, V.Ya., Gluskin, N.Ya. et al. (1984). Bimetallic materials. L.: Shipbuilding, 272 p. [in Russian].
3. Sirotenko, L.D., Shlykov, E.S., Abliaz, T.R. (2015). The use of bimetallic materials in mechanical engineering. (El. magazine) *Modern problems of science and education*, no. 2, part. 1 [in Russian].
4. Korol', V.K., Hindelgom, M.S. (1970). Fundamentals of production technology of multilayer metals. Moscow.: Metallurgiya, 237 p. [in Russian].
5. Bykov, A. (2011). Bimetal production and applications. *Steel in Translation*, Vol. 41, Iss. 9, pp. 778–786 [in English].
6. Snezhko, A.A. (Ed.) (1976). Casting bimetallic products. Kiev: IPL AS USSR, 122 p. [in Russian].
7. Kostenko, G.D. (Ed.) (1991). The state and prospects of development of bimetallic and multilayer casting. Collection of scientific papers. Kiev: IPL AS USSR, 126 p. [in Russian].
8. Wrobel, T., Szajnar, J. (2015). Bimetallic casting: ferritic stainless steel – gray cast iron. *Archives of metallurgy and materials*. Vol. 60, Iss. 3. pp. 2361–2365 [in English].
9. Yuanhu Yi-qing, Chengang Huang-dong, Huzi-ang Zhu (2016). Microstructure and properties of Al/Cu bimetal in liquid–solid compound casting process. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, June 2016, Vol. 26, Iss. 6, pp. 1555–1563 [in English].
10. Shiryayev, V.V., Pelikan, O.A., Shinsky, I.O., Glushkov, D.V., Romanenko, Yu.N. (2009). Technological features of the production of bimetallic (multilayer) castings with increased wear resistance. *Metall i lit'e Ukrainy*, no. 7-8, pp. 52–56 [in Russian].
11. Gerasimov, V.G. (1982). Research and development of centrifugal casting technology for long bimetallic billets for tracked tractor fingers. Extended abstract of candidate's thesis. Kiev: VNITI and IPL AS USSR, 22 p. [in Russian].
12. Krivomazov, V.A. (1967). Development and research of the automation system for the casting process of bimetallic rotation bodies by centrifugal method. Extended abstract of candidate's thesis. Kiev: IPL AS USSR, 26 p. [in Russian].
13. Nazari, J., Yousefi, M., Amiri Kerafroudi, M.S., Bahrololoumi Mofrad, N.S., Alami Abhari, S.H. (2015). Production of Copper-Aluminum Bimetal Copper-Metal Casting-on-Metal-Casting. *International Journal of Materials Lifetime*, Vol. 1, no. 1, pp. 20–28 [in English].
14. Paton, B.E. (2008). Selected Works. Kiev: IES im. E.O. Paton of NAS of Ukraine, 893 p. [in Russian].
15. Grinberg, B.A., Ivanov, M.A., Rybin, V.V. et al. (2012). Heterogeneity of the interface during explosion welding. *Physics of Metals and Metal Science*, Vol. 113, no. 2, pp. 187–200 [in Russian].
16. Malakhov, A.Yu., Saikov, I.V., Pervukhin, A.B. (2016). Peculiarities of explosion welding of pipes according to the “reverse” scheme, *Vestnik of Tambov University*, Vol. 21, no. 3. pp. 1139–1140 [in Russian].
17. Zlobin, B.S. (2002). Explosion of Steel with Aluminum. *Combustion, Explosion and Shock Waves*, May 2002, Vol. 38, Iss. 3, pp. 374–377 [in English].
18. Prazmowski, M., Najwer, M., Paul, H., Andrzejewski, D. (2016). Influence of Ti-carbon steel. MATEC Web Conf. Vol. 94, 2017, the 4th International Conference on Computing and Solutions in Manufacturing Engineering, CoSME'16, p. 8 [in English].
19. Schmidt, M., Kuryntsev, S.V. (2014). Production of bimetallic billets using laser welding with a weld seam. *Automatic welding*, no. 4, pp. 47–51 [in Russian].
20. Riabtsev, I.A., Kondrat'ev, I.A., Perepletchikov, E.F. (2015). Surfacing. Technologies, materials, equipment. Kiev: IES im. E.O. Patona of NAS of Ukraine, 402 p. [in Russian].
21. Sosnin, N.A., Ermakov, S.A., Topolyansky, P.A. (2013). Plasma Technologies. *Manual for Engineers*. St. Petersburg: Publishing House of the Polytechnic University, 406 p. [in Russian].
22. Bafaev, D.Kh. (2016). Plasma surfacing, hardening and the choice of the method of restoration of machine parts. Materials of the VI Intern. scientific conf. Moscow: Buki-Vedi, pp. 65–68 [in Russian].
23. Capp, M.L., Rigsbee, J.M. (1984). Laser processing of plasma-sprayed coatings. *Materials science and Engineering*, Vol. 62, no. 1, pp. 49–56 [in English].
24. Blinkov, I.V., Orekhov, I.E. (1996). Formation of composite materials by laser surfacing and their tribological properties. *Izv. Vuzov. Chernaia metallurgiya*, no. 1 [in Russian].
25. Odintsov, N.N., Shternin, L.A. (1987). Increasing productivity and expanding the possibilities of laser surfacing, *Svar. pr-vo*, no. 2, pp. 1–4 [in Russian].
26. Kovalenko, V.S., Golovko, L.F. (1990). Hardening and doping of machine parts with a laser beam. Kyiv: Tekhnika, 191 p. [in Russian].
27. Shatrava, A.P. (2001). Controlling the formation of anti-friction cladding layers of composite materials based on Fe-Cu under the action of laser radiation. Extended abstract of candidate's thesis. Kiev: NTUU KPI, 20 p. [in Russian].
28. Shatrava, A.P. (2001). Physico-mechanical characteristics of composite laser coatings. Tez. report at conf. of young scientists and specialists. FTA, 2001 [in Russian].
29. Shatrava, A.P. (2002). Physico-mechanical characteristics of steel-bronze coatings obtained using laser surfacing. *Automatic welding*, no. 5, pp. 60–61 [in Russian].
30. Naydek, V.L., Likhoshva, V.P., Shatrava, A.P. (2002). Tribotechnical composite coatings obtained by laser gas-powder surfacing. Proc. report on the int. scientific-tech. congress “Foundry production in the new century...”. Kiev, 2002 [in Russian].
31. Likhoshva, V.P., Shatrava, A.P. (2017). Foundry-laser liquid-phase compound of dissimilar materials. Proc. report at the VI Intern. scientific and practical conf. “Metallurgy-2017”, Zaporozhye, pp. 164–165 [in Russian].
32. Likhoshva, V.P., Shmatko, O.V. (2017). Continuous casting-plasma method of obtaining bimetallic and multilayer structures. Proc. report at the VI Intern. scientific and practical conf. “Metallurgy-2017”, Zaporozhye, pp. 165–166 [in Ukrainian].
33. Likhoshva, V.P., Nadashkevich, R.S. (2017). New progressive method of obtaining bimetallic and multilayer products. Proc. report at the VI Intern. scientific and practical conf. “Metallurgy-2017”, Zaporozhye, pp. 166–168 [in Ukrainian].

Received 18.10.2018

Анотація

В.П. Лихошва, д-р техн. наук, проф., зав. відділу; **О.П. Шатрава**, канд. техн. наук, ст. наук. співр., e-mail: shatrava@ptima.kiev.ua; **О.А. Пелікан**, наук. співробітник

*Фізико-технологічний інститут металів і сплавів НАН України,
м. Київ, Україна*

Сучасні способи виробництва біметалевих виробів

У статті наведено історію і результати виробництва та застосування біметалевих матеріалів з часу їх винаходу по сьогоднішній день. Наведено основні технологічні параметри і результати різних методів їх отримання – традиційних, таких як пресування, лиття, прокатка, зварювання вибухом та ін. і сучасних – зварювання, наплавлення, напилення та ін. У статті показано, що застосування біметалевих виробів набуває все більшого поширення при виробництві та відновленні зношених деталей в хімічній, нафтохімічній, харчовій та машинобудівній промисловості завдяки отриманню унікальних комплексів властивостей: високої міцності, жароміцності, корозійностійкості, електропровідності і теплопровідності, технологічності та ін.

Також в статті показано участь вчених і фахівців ФТІМС НАН України в розробці традиційних ливарних методів отримання біметалів, а також запропоновано підходи до створення нових гібридних методів ливарно-лазерної обробки для отримання біметалевих та багатошарових виробів, що дозволяє поєднати переваги використання концентрованих джерел енергії з традиційними ливарними технологіями виробництва і відновлення деталей машин.

Ключові слова

Біметалеві конструкції, класифікація біметалів, прокатка, відцентрове лиття, зварювання вибухом, лазерне наплавлення, ливарно-лазерна обробка.

Summary

V.P. Likhoshva, Doctor of Engineering Sciences, Prof., Head of Department; **A.P. Shatrava**, Candidate of Engineering Sciences, Senior Researcher, e-mail: shatrava@ptima.kiev.ua; **O.A. Pelikan**, Researcher

Physico-technological Institute of Metals and Alloys of NAS of Ukraine, Kiev, Ukraine

Modern methods of manufacturing bimetallic products

The article gives the history and results of production and application of bimetallic materials from the time of their invention to the present day. The main technological parameters and results of various methods for their production are given, such as pressing, casting, rolling, explosion welding, and modern ones – welding, surfacing, sputtering, etc.

The article shows that the use of bimetallic products is becoming more common in the production and recovery of worn parts in the chemical, petrochemical, food and industrial engineering industries by obtaining unique properties: high corrosion resistance, strength, heat resistance, corrosion resistance, electrical conductivity and thermal conductivity, etc.

The article also shows the participation of scientists and specialists from the PTIMA of NAS of Ukraine in the development of traditional foundry methods for obtaining bimetals, as well as approaches to the development of new hybrid methods of foundry-laser processing to produce bimetallic and multilayered products, which allows to combine the advantages of using concentrated sources energy with traditional foundry technologies for the production and restoration of machine parts.

Keywords

Bimetallic structures, bimetal classification, rolling, centrifugal casting, explosion welding, laser cladding, casting-laser processing.

Т.В. Лысенко, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой

М.П. Тур, ст. преподаватель

К.А. Крейцер, аспирант

Е.Н. Козишкурт, аспирант, e-mail: igonua@gmail.com

Одесский национальный политехнический университет, г. Одесса, Украина

Усовершенствование оборудования и технологии литья под давлением для получения тонкостенных отливок

Рассмотрена возможность усовершенствования машин и технологии литья под давлением с целью повышения конкурентоспособности отечественных производств на международном рынке. На основе проведенного исследования авторами предлагается комплект решений по модернизации оборудования и технологии литья под давлением сложных тонкостенных и плотных толстостенных отливок.

Ключевые слова: модернизация, технологический процесс, тонкостенные отливки, литье под давлением, цветные сплавы.

Литейное производство в Украине, в том числе литье под давлением, являясь основной заготовительной базой отечественного машиностроения, продолжает усовершенствовать технологии и оборудование для получения сложных отливок.

Количество отливок, получаемых литьем под давлением, составляет 30–40 % от всей массы литья. Технологическое оснащение литейных предприятий является основным препятствием для успешной конкуренции отечественных производителей на зарубежных рынках. Старое оборудование и технологии не позволяют производить высококачественное литье [1, 2]. Для приобретения современного импортного оборудования необходимы большие капиталовложения. Кроме того, использование импортного оборудования требует полного изменения инфраструктуры производства, что для многих предприятий является сложной задачей.

Выход из этой ситуации – апробированная во всем мире стратегия, направленная на устранение самых слабых мест в оборудовании и технологиях действующих производств, с учетом существующей инфраструктуры.

На международных выставках ведущие фирмы Германии, Италии, Великобритании, Испании, Бельгии, Турции, Тайваня, США представляют проекты усовершенствованных отдельных элементов оборудования и технологий литья под давлением. То есть, исследования, направленные на увеличение производства литья под давлением, являются весьма актуальными.

В настоящей работе представлен комплект решений по модернизации оборудования (основных функциональных узлов) и технологии литья под давлением для получения сложных тонкостенных и плотных толстостенных отливок: на машине литья под давлением с холодной горизонтальной камерой прессования и усилием записания 250 т.

Безударный узел прессования позволяет реализовать все фазы заполнения формы сплавом и ре-

гулировать давление на жидкую фазу при кристаллизации (это соответствует лучшим зарубежным образцам). Кроме того, узел позволяет полностью исключить гидравлический удар в форме без влияния на характер ее заполнения сплавом (такого качественного по технологии решения не имеет ни одна из ведущих европейских фирм).

Быстродействующий узел запирающего позволяет без изменений рычажной системы за счет новых решений гидравлической схемы сократить время смыкания-размыкания формы в 1,5–2 раза, снизить мощность гидропривода на эти операции, обеспечить соприкосновение полуформ без усилия, что значительно повышает ресурс дорогостоящей формы.

Система вакуумирования пресс-формы, несмотря на дополнительные расходы, добавляет технологическому процессу неоспоримые преимущества: вакуум изымает лишнее масло с рабочей поверхности формы – исчезает такой вид брака, как следы масла на отливке. Удаление воздуха из формы исключает газовую пористость. Во время записывания, вакуум создает эффект повышения жидкотекучести сплава, что позволяет снизить температуру сплава и формы, или изменить сплав на более дешевый, снизить время кристаллизации, повысить производительность литья. Как техническое решение предусматривается применение централизованного вакуумного компрессора в отличие от известных решений иностранных фирм, которые используют индивидуальные компрессоры. Это позволяет снизить установленную мощность при 5-ти машинах в два раза.

Система управления на базе средств фирмы «Siemens» обеспечивает управление циклом, регулирование параметров технологического процесса, диагностику технических средств и визуальное отображение текущей информации.

Предложенный комплект решений по оборудованию и технологии подлежит корректировке в каждом конкретном случае, в зависимости от требований к отливке. Это позволяет повысить качество литья при

меньших затратах на модернизацию оборудования и технологии.

Для исследований и отработки основных функциональных узлов наиболее массовой машины литья под давлением с усилием запирания 250 т были использованы узлы, отдельные детали и элементы морально и физически изношенного оборудования. Это позволило создать экспериментальный стенд, под который были разработаны основные функциональные узлы.

На рис. 1 приведен общий вид стенда, в состав которого входят:

- электрошкаф (поз. 1);
- станина (поз. 3);
- механизм запирания (поз. 4);
- ограждение (поз. 5);
- система смазки (поз. 6);
- насосная установка низкого давления (поз. 8);
- насосная установка высокого давления (поз. 9).

Конструкция стенда такова, что позволяет выполнить монтаж узла прессования и системы вакуумирования формы, а также дополнить гидропривод узла запирания для его быстродействия. С существующей машины модели 71108 использовались: станина, механизм запирания, ограждение, система смазки.

Электрогидропривод стенда разработан с использованием отдельных элементов гидропривода старых машин литья под давлением мод. 711A08 и мод. 711B08. Насосные установки и электрошкаф разработаны и изготовлены заново с учетом требований к новым узлам.

Разработана универсальная схема гидропривода машины литья под давлением, соответствующая требованиям динамики силовых гидрофицированных аккумуляторных узлов. Насосная установка низкого давления подает через маслоохладитель и фильтр тонкой очистки (10 мкм) рабочую жидкость на всасывающий вход насоса высокого давления. Такая схема позволяет резко снизить шумовые характеристики насоса высокого давления и его ресурсные характеристики. В связи с использованием аккумуляторных приводов разработанный гидропривод пригоден для использования на трех типоразмерах машин – 160, 250 и 400 т запирания.

На базе современных промышленных средств компьютерной техники фирмы «Siemens» разработана типовая система управления.

Основные функциональные узлы экспериментального комплекта оборудования прошли соответствующую обкатку на стенде с наладкой программного

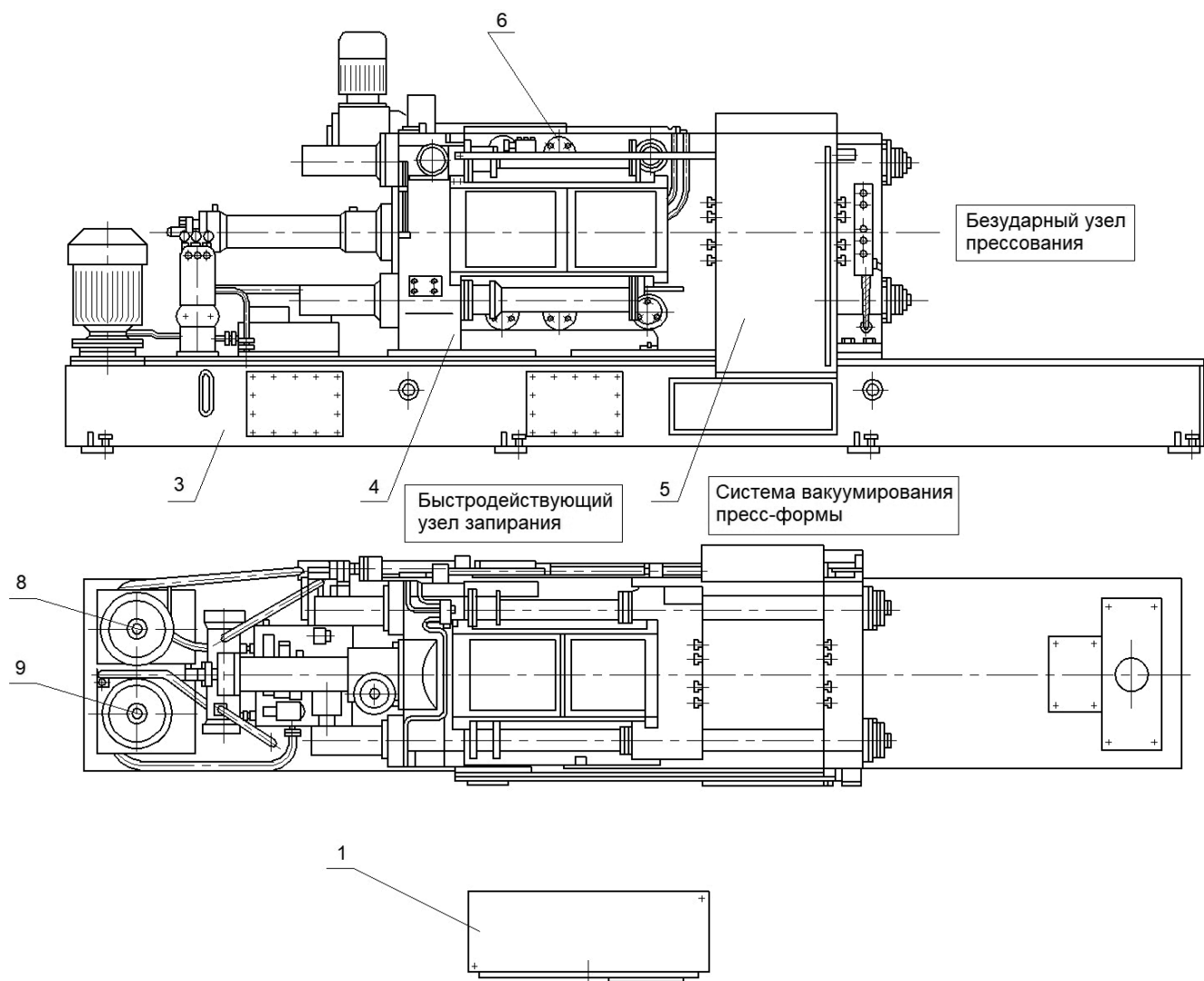


Рис. 1. Стенд на базе машины литья под давлением

Соответствие параметров технической документации и технического задания результатам, полученным на стенде

Содержание требований технической документации и технического задания	Значение		Вывод
	по техдокументации	на стенде	
Усилие запираания	250 т. з.	250 т. з.	Соответствует
Ход подвижной плиты	4,5 м	4,50 м	Соответствует
Расстояние между колоннами по горизонтали и вертикали	5,3 м	5,30 м	Соответствует
Толщина пресс-формы – наибольшая	6 м	6 м	Соответствует
– наименьшая	2,6 м	2,6 м	Соответствует
Масса заливаемой порции алюминиевого сплава	4 кг	4 кг	Соответствует
Усилие прессования	30 т. з.	30 т. з.	Соответствует
Количество позиций заливки / смещение позиции заливки вниз	2/1,6 м	2/1,6 м	Соответствует
Максимальная скорость холостого хода прессующего плунжера	5 м/с	5 м/с	Соответствует
Диаметр стаканов – наименьший	0,045 м	0,045 м	Соответствует
– наибольший	0,095 м	0,095 м	Соответствует
Давление запрессовки – наименьшее	41,19 МПа	41,19 МПа	Соответствует
– наибольшее	185,3 МПа	185,3 МПа	Соответствует

управления в автоматическом цикле. Обкатка проходила в течение 60 часов.

После обкатки стенд был оборудован специальными средствами для снятия предельных динамических и статических параметров.

Ниже приведена табл. 1 соответствия параметров технической документации и технического задания результатам, полученным на стенде.

Во время подготовки к исследованиям проведено масштабирование всех фиксируемых значений результатов [4]: давления в поршневой и штоковой полостях цилиндра прессования, в аккумуляторе скорости, усилия на штоке пресс-поршня, вакуума и подсчета пути (рис. 2).

Полученные данные показали достаточно высокую плотность распределения параметров. Отклонения не превышали $\pm 2\%$. Графики динамических параметров позволяют достаточно глубоко анализировать технологический процесс, время которого измеряется миллисекундами.

Кривые пути и скорости представляют картину движения сплава в пресс-камере и заполнение формы, а наложенные на них кривые давления в полостях ци-

линдра прессования и усилия на штоке позволяют отрегулировать момент жесткого торможения и регулировки фаз подпрессовки, исключая, с одной стороны, появление в форме гидравлического удара, а с другой – максимально использовать давление подпрессовки для устранения усадочных дефектов.

Для разработки и испытания технологического процесса для сложных тонкостенных отливок (одна деталь-представитель) был создан рабочий участок

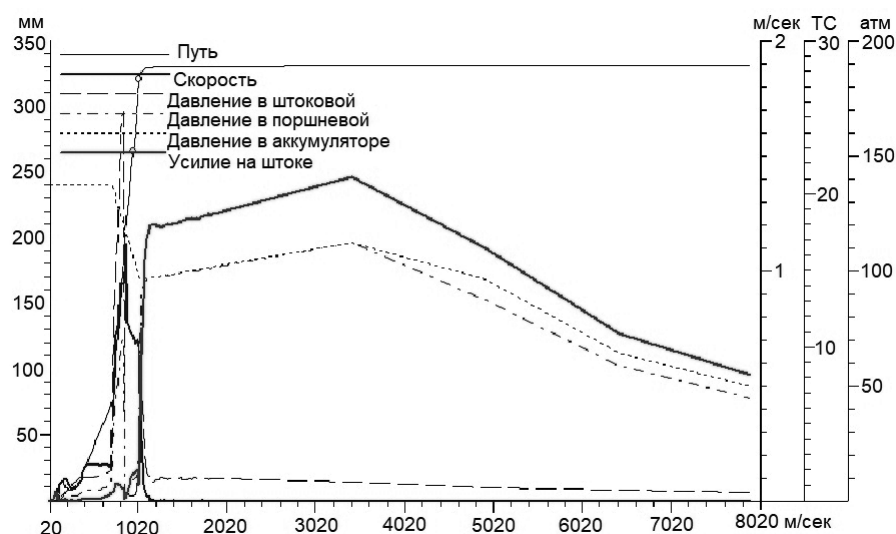


Рис. 2. График параметров прессования отливки «Корпус магистрального усилителя кабельного телеканала»

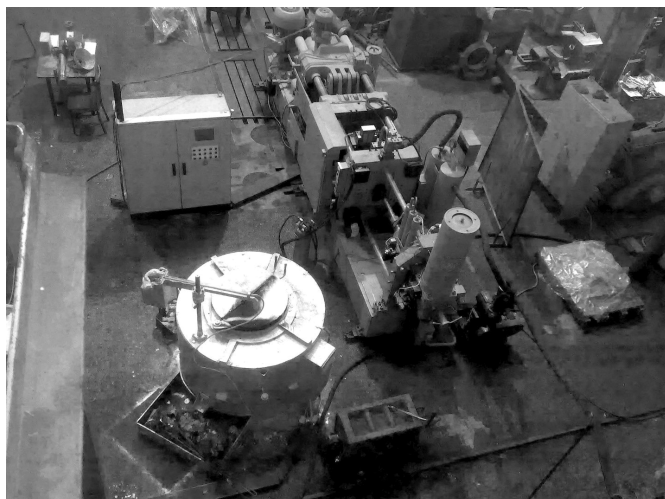


Рис. 3. Рабочий участок

Таблица 2

Основные данные детали-представителя (корпус магистрального усилителя кабельного телеканала)

Вес отливки, кг	0,8
Вес порции заливаемого расплава, кг	1,2
Толщина ребер, мм	до 0,003
Марка сплава	AK5M2
Глубина внутренняя, м	0,03
Количество деталей в форме, шт.	1
Габариты:	
Длина, м	0,297
Ширина, м	0,2
Глубина, м	0,048
Основная толщина, м	0,005

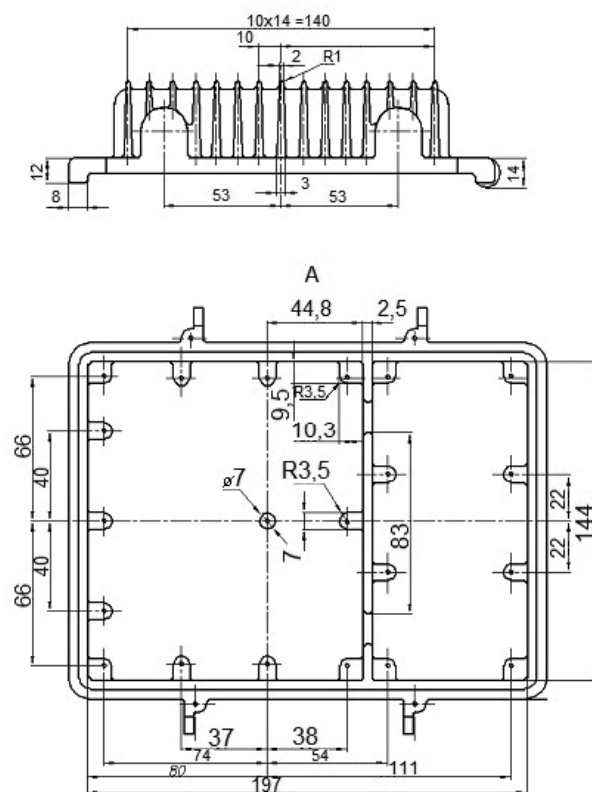
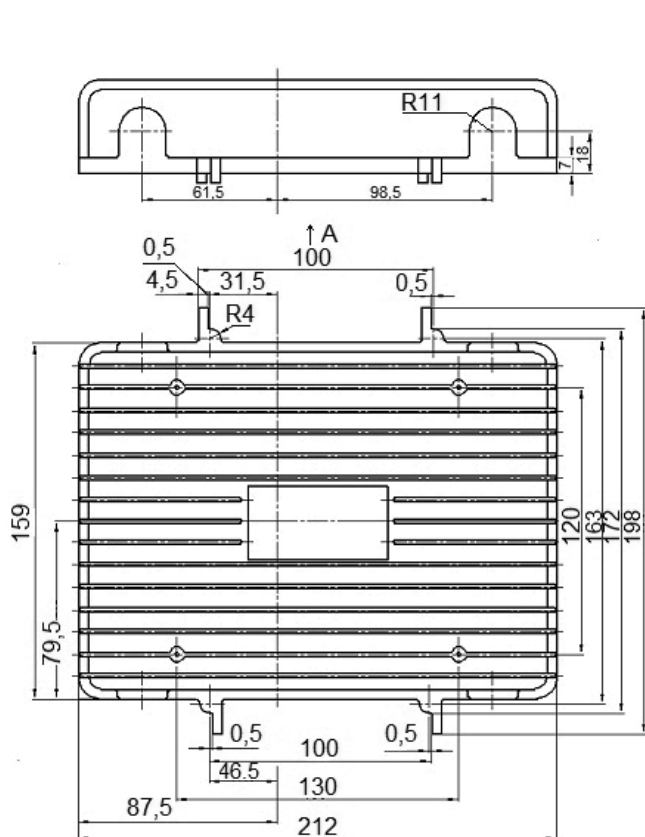


Рис. 4. Корпус магистрального усилителя кабельного телеканала

(рис. 3) на базе станда, основных функциональных узлов, плавильно-раздаточной печи, вакуумного агрегата, устройства нанесения защитных масел на рабочую поверхность формы [5].

В качестве детали-представителя тонкостенного литья выбран корпус магистрального усилителя кабельного телеканала (рис. 4).

Требования к отливке:

- герметичность;
- товарный внешний вид.

На указанную отливку разработан технологический процесс. Данные детали представлены в табл. 2.

В соответствии с расчетными параметрами технологического процесса проведены плавки, во время которых было отлито 500 отливок.

Во время работы уточнялись параметры технологического процесса для получения качественного литья.

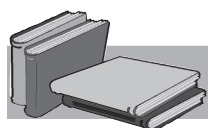
Технологические возможности экспериментального образца комплекта оборудования соответствуют возможностям современных машин литья под давлением, обеспечивая возможность получения качественного литья с определенными характеристиками, например, по плотности, качеству поверхности, металлоемкости.

Совершенствование машин литья под давлением (исследование фирм-производителей США, Италии) осуществляется в направлении повышения скорости впуска металла в пресс-форму, скорости и ускорения пресс-поршня, повышения удельного давления на металл, исключения гидравлического удара в пресс-

форме за счет переноса прочности торможения пресс-поршня внутрь силового цилиндра, уменьшение времени рабочего цикла (повышение производительности) и использование режимов термостатирования и вакуумирования пресс-формы [6]. Например, во время испытательных работ фирм США повышение удельного давления до 588,4 МПа (современный уровень до 245,2 МПа) приводило к повышению прочности литья, измельчению структуры, снижению металлоемкости детали при хранении служебных качеств. В экспериментальных работах фирм Италии при повышении скорости пресс-поршня выше 6 м/с (современный уровень до 5 м/с) получены отливки (радиаторы-конвекторы) с толщиной стенки 0,0008 м.

Экспериментальный образец комплекта оборудования стабильно функционирует на уровне повышения параметров технологических режимов в 1,3 раза.

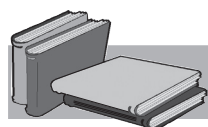
Повышение параметров технологических режимов в 1,6–1,8 раза привело к разрушению силовых элементов узлов прессования и запираания, к сбоям в системе управления, разрушению гидравлических уплотнений, подклиниванию силовых пар трения, выходу из строя электроприборов (электромагнитов, датчиков пути, датчиков давления, гидронасосов и т. д.).



ЛИТЕРАТУРА

1. *Иванов В.Н.* Специальные виды литья: учебное пособие. – М.: МГИУ, 2007. – 316 с.
2. *Гини Э.Ч., Зарубин А.М., Рыбкин В.А.* Технология литейного производства: Специальные способы литья. – М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 352 с.
3. *William D Callister Jr.* (2006). Materials Science and Engineering, An Introduction. John Wiley& sons, Inc.
4. *Дуюнова В.А., Гончаренко Е.С., Мухина И.Ю.* Современные исследования магниевых и литейных алюминиевых сплавов в ВИАМ // *Цветные металлы*. – 2013. – № 9. – С. 71–78.
5. *Антипов В.В.* Стратегия развития титановых, магниевых, бериллиевых и алюминиевых сплавов // *Авиационные материалы и технологии*. – 2012. – № 5. – С. 157–167.
6. *Корнышева И.С., Волкова Е.Ф.* Перспективы применения магниевых и литейных алюминиевых сплавов // *Авиационные материалы и технологии*. – 2012. – № 5. – С. 212–222.

Поступила 19.10.2018



REFERENCES

1. *Ivanov, V.N.* (2007). Special types of casting: tutorial. Moscow: MGIU, 316 p. [in Russian].
2. *Gini, E.Ch., Zarubin, A.M., Rybkin, V.A.* (2005). Casting technology: Special casting methods. Moscow: Izdatel'skii tsentr "Akademii", 352 p. [in Russian].
3. *William D Callister Jr.* (2006). Materials Science and Engineering, An Introduction. John Wiley& sons, Inc. [in English].
4. *Duiunova, V.A., Goncharenko, E.S., Mukhina, I.Yu.* (2013). Modern investigations of magnesium and casting aluminium alloys in VIAM. *Tsvetnye metally. Nonferrous metals*, no. 9, pp. 71–78 [in Russian].
5. *Antipov, V.V.* (2012). Development strategy of titanium, magnesium, beryllium and aluminum alloys. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii. Aviation materials and technologies*, no. 5, pp. 157–167 [in Russian].
6. *Kornysheva, I.S., Volkova, E.F.* (2012). Prospects of application of magnesium and casting aluminum alloys. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii. Aviation materials and technologies*, no. 5, pp. 212–222 [in Russian].

Received 19.10.2018

Анотація

Т.В. Лисенко, д-р техн. наук, проф., зав. кафедри; **М.П. Тур**, ст. викладач; **К.О. Крейцер**, аспірант; **Є.М. Козішкурт**, аспірант, e-mail: igonua@gmail.com

Одеський національний політехнічний університет, м. Одеса, Україна

Удосконалення обладнання та технології лиття під тиском для отримання тонкостінних виливків

Розглянуто можливість удосконалення машин і технології лиття під тиском з метою підвищення конкурентоспроможності вітчизняних виробництв на міжнародному ринку. На основі проведеного дослідження авторами пропонується комплект рішень з модернізації обладнання та технології лиття під тиском складних тонкостінних та щільних товстостінних виливків.

Ключові слова

Модернізація, технологічний процес, тонкостінні виливки, лиття під тиском, кольорові метали.

Summary

T.V. Lysenko, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of Department; **M.P. Tur**, Senior Lecturer; **K.A. Kreitser**, Postgraduate; **E.N. Kozishkurt**, Postgraduate, e-mail: igonua@gmail.com

Odessa National Polytechnic University, Odessa, Ukraine

Improvement of equipment and technology of injection molding for production of thin-walled castings

The possibility of improving the injection molding machines and technology with the aim of improving the competitiveness of domestic production in the international market is considered. Based on the study, the authors propose a set of solutions for the modernization of equipment and technology of injection molding of complex thin-walled and thick-walled castings.

Keywords

Modernization, technological process, thin-walled castings, injection molding, non-ferrous alloys.

Технологическое решение изготовления формообразующей оснастки по керамическим армированным стержням

При исследовании способа получения точнолитой формообразующей оснастки для изготовления корпусов водонапорной арматуры предложено технологическое решение получения цельнолитой конструкции вставки пресс-формы по керамическим армированным стержням. Расплав подвергался комплексному воздействию с целью улучшения структуры и физико-механических свойств отливок, что позволило получить точнолитую вставку пресс-формы с прочностью на уровне штампованных сталей.

Ключевые слова: *цельнолитая вставка пресс-формы, комплексное модифицирование, вакуумирование, вибрация.*

Литье под давлением занимает одно из ведущих мест в литейном производстве, так как дает возможность изготавливать отливки самой разнообразной конфигурации массой от нескольких граммов до 30 кг и более. В теории и практике процесса литья высокотемпературных сплавов под давлением особое внимание уделяется проблеме стойкости формообразующей оснастки. Стоимость формообразующей оснастки для литья под давлением составляет около 50 % затрат, а большой объем механической обработки высоколегированных сталей, сложность конфигурации и поверхностного рельефа вставок пресс-форм непосредственно отражается на увеличении затрат на их изготовление.

Повышение термической стойкости и снижение затрат на изготовление формообразующей оснастки для литья под давлением представляет одну из актуальных задач в области специальных способов литья. Вставки пресс-форм, изготовленные из литой стали по предложенной технологии, за счет ликвационной неоднородности, направленной и ускоренной кристаллизации, комплексной обработки расплава проявили более высокие эксплуатационные свойства по сравнению с образцами из ковanej стали.

При исследовании способа получения точнолитой формообразующей оснастки для изготовления корпусов водонапорной арматуры предложено технологическое решение получения цельнолитой конструкции вставки пресс-формы по керамическим армированным стержням. При этом две половинки вставки отливают единой отливкой, а затем разрезают по линии разъема. Такое решение продиктовано тем, что вставки трехместные и при смыкании двух половин необходимо совпадение гнезд. Изготовить же две отливки с абсолютным совпадением межосевых расстояний практически не представляется возможным, так как при литье получить гарантированную размерную точность весьма сложно.

На рис. 1 представлена принципиальная схема технологического процесса изготовления цельнолитых вставок пресс-форм.

При проектировании оснастки учитывалась особенность технического решения. Стержневой ящик

для получения армированных керамических стержней, оформляющих внутреннюю полость формы, изготавливали из алюминия путем отливки заготовок и механической обработки с последующей доводкой. В размеры стержневого ящика закладывали припуск на разрез 8 мм по линии разъема.

В качестве материала для изготовления модели, прибыли и литниковой системы выбрано дерево. Размеры модели, оформляющей внешние контуры отливки, выбирали с учетом усадки стали 40Х5МФС, припуска на разрез 8 мм и припуска на механическую обработку 4 мм. Модель изготавливали разъемной. Плоскость разъема модели соответствует плоскости разъема готовой отливки. Литниковая система и прибыль рассчитывались по известным методикам для стали.

Керамические армированные стержни (рис. 2) получали из этилсиликатной керамики на основе пылевидного циркона. Выбор огнеупорного наполнителя – циркона обусловлен более высоким коэффициентом теплоаккумулирующей способности (в 1,2 раза выше, чем у кварца). При применении керамики на основе кварца ухудшается качество отливок из стали 40Х5МФСЛ из-за поверхностного обезуглероживания. На поверхности отливок, полученных в кварцевые формы, имелся обезуглероженный слой толщиной 0,5 мм, а с применением форм на основе циркона – слой толщиной 0,2 мм.

В качестве арматуры использовался стальной прут диаметром 15 мм с накаткой для улучшения крепления керамики, который устанавливался в специальные пазы стержневого ящика (рис. 3).

Установлено, что плотность керамических образцов возрастает пропорционально увеличению содержания наполнителя в суспензии. В соотношении концентрат цирконовый и гидролизированный этилсиликат (КЦ/ГЭТС) = 3,3 плотность равна 1,9 г/см³, а при соотношении КЦ/ГЭТС равном 4, плотность керамического образца увеличивается до 2,5 г/см³. При этом пористость керамических стержней изменяется от 54 до 42 %.

Исследования показали положительный эффект вакуумирования суспензии и применения вибрации

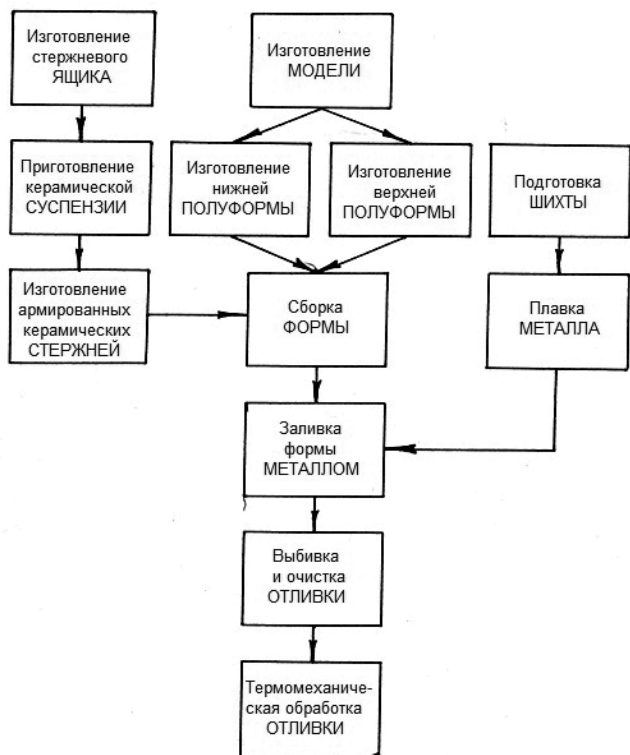


Рис. 1. Принципиальная схема технологического процесса изготовления цельнолитых вставок пресс-форм



Рис. 2. Керамический армированный стержень

в ходе заполнения суспензией стержневого ящика. Керамика без внешнего воздействия имеет пористость $45 \div 48 \%$, плотность – $2 \div 2,4 \text{ г/см}^3$.

Выполненные исследования позволили выработать следующие практические рекомендации:

1. Керамическая суспензия, содержащая 4 массовые доли цирконового концентрата и одну массовую долю ГЭТС, обеспечивает наибольшую плотность керамических стержней.

2. Вибрация и вакуумирование (-1) стержневого ящика при заполнении его керамической суспензией способствует качественному заполнению полостей с тонкорельефной поверхностью.

Перед заливкой керамическая суспензия подвергалась вакуумированию при глубине вакуума (-1) до полного удаления пузырьков воздуха в течение 2–3 минут.

Затем производилась заливка керамической суспензии в стержневой ящик при одновременном вакуумировании полости стержневого ящика и вибрационном воздействии (рис. 4). Вакуумирование прекращали в момент появления керамической су-

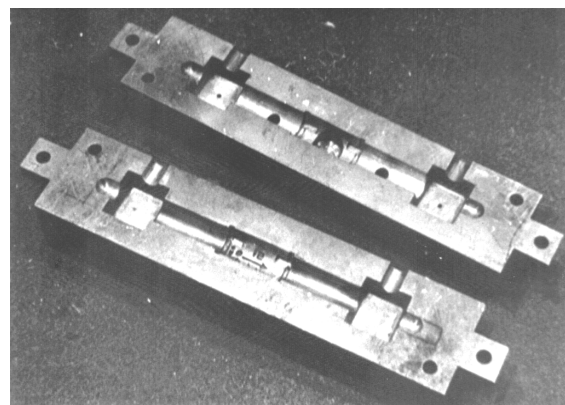


Рис. 3. Стержневой ящик

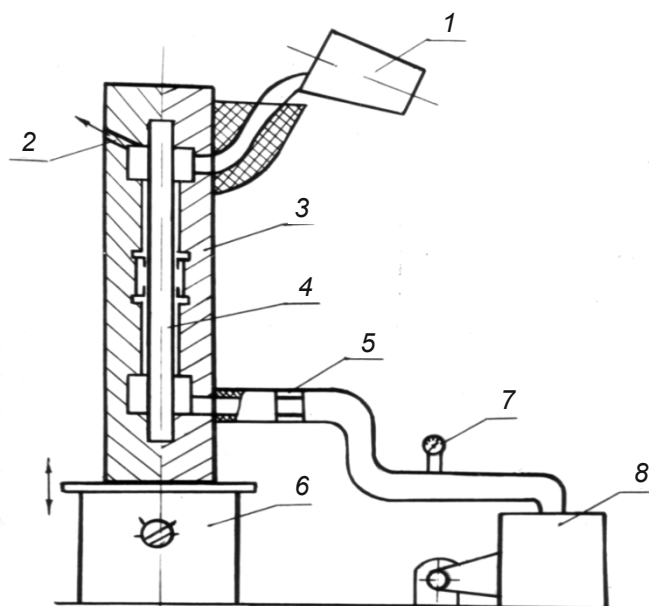


Рис. 4. Технологическая схема установки для получения керамических стержней: 1 – емкость с керамической суспензией; 2 – канал для выхода газов; 3 – стержневой ящик; 4 – арматура; 5 – стеклянная трубка; 6 – вибратор; 7 – манометр; 8 – вакуумный насос

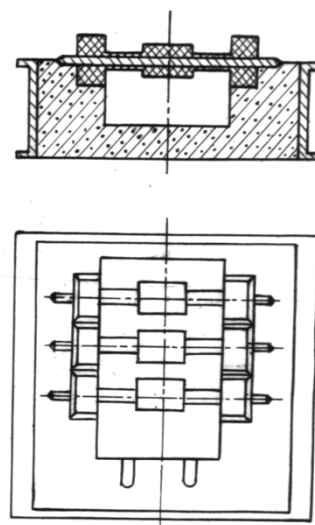


Рис. 5. Нижняя полуформа с керамическими стержнями

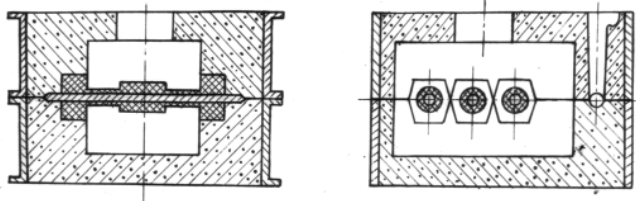


Рис. 6. Форма в сборе

спензии в стеклянной трубке 5. Вибратор 4 отключали после появления керамической суспензии из канала для выхода газов 2.

В начальный момент твердения керамической облицовки, когда она принимает резиноподобное состояние, ящик раскрывали и стержень извлекали. Время твердения керамики – 3,0–3,5 минут. Затем керамический стержень поджигали с целью выгорания летучих веществ, прокаливали в печи при температуре 900–950 °С в течение 1,5–2,0 часов.

Полуформы верха и низа изготавливали из песчано-жидкостекольной смеси, состоящей из 95 % кварцевого песка 1K020A – 1K0315A и 5 % жидкого стекла. Отверждение смеси после формовки проводилось в оснастке продувкой CO₂ через наколы. В качестве разделительного покрытия на поверхности раздела форма – модель применяли серебристый графит. Керамические армированные стержни устанавливали в нижнюю полуформу (рис. 5) и накрывали полуформой верха (рис. 6).

Плавка стали проводилась в индукционной тигельной печи с кислой футеровкой, позволяющей проводить комплексное модифицирование, рафинирование инертными газами и раскисление металла в тигле. В качестве модификаторов были выбраны следующие модификаторы: бор, церий, силикокальций.

Бор выбран из соображений, связанных с рядом факторов, и, прежде всего, с модифицирующим влиянием бора на процессы кристаллизации стали, приводящем к значительному измельчению первичных зерен – кристаллитов [3]. Известна также высокая химическая активность бора по отношению к кислороду и азоту. Повышенная устойчивость аустенита к распаду при переохлаждении, а, следовательно, повышенная прокаливаемость – свойство, определяющее степень однородности структуры и уровень механических свойств термически обработанных деталей. Кроме того, под влиянием бора возможно изменение состава и морфологии избыточных фаз, выделяющихся по границам кристаллов и вторичных зерен в сложнолегированных сталях, для улучшения их способности к горячей пластической деформации.

Силикокальций – один из традиционных модификаторов и раскислителей, применяемый при плавке стали. Кальций выполняет раскислительную функцию, образуя продукты раскисления, отличающиеся низким удельным весом и малой адгезией, легко всплывающие на поверхность расплавов, что приводит не только к изменению их состава и морфологии. Кальций выполняет модифицирующую функцию, что непосредственно связано с влиянием кальция на поверхностное натяжение. Кальций, как поверхностно-активное вещество, скапливается в виде «вала» на

поверхности растущих зерен первичной кристаллизации, препятствуя тем самым развитию скелетных форм дендритов. Однако, эффект модифицирования кальцием в значительной степени зависит от его растворимости в металле. Чем больше растворимость кальция в металле, тем эффект модифицирования сильнее.

Церий выбран с учетом его модифицирующего и раскисляющего воздействия, а также высокой способности к десульфурации. Учитывая высокую раскислительную способность бора, кальция и церия, неизменным условием получения модифицирующего эффекта от введения комплексного модификатора является полное раскисление стали алюминием.

Состав выбранного комплексного модификатора (в %): ферроцерий – 0,1; ферробор – 0,005; силикокальций – 0,15; алюминий – 0,13.

Частично состав раскисляется в печи. Модифицирование производится в ковше под колокольчиком во избежание пиррозэффекта. Состав комплексного модификатора (%мас.): ферроцерий – 0,1; силикокальций – 0,15; ферробор – 0,005. С целью снижения угара молибдена, хрома, ванадия при переплаве отходов стали 4X5МФС проводится предварительное раскисление. При этом вначале в печь вводится ферромарганец, затем – ферросилиций или силикокальций. Окончательное раскисление проводится за 10 минут до выпуска плавки из печи.

Для получения высоких механических свойств стали необходимо максимально освободить расплав от продуктов окисления, являющихся источником эндогенных включений. Достигается это продувкой расплава аргоном.

Температура заливки стали – 1640–1660 °С. Шихта рассчитывалась на химический состав стали 40X5МФС. После заливки и выбивки отливка отжигалась при температуре 840–860 °С. Затем для снятия напряжений при черновой обработке выполнялся отпуск при температуре 650 °С в течение 2–3 часов.

После механической обработки проводилась термическая обработка по следующим режимам:

- закалка – загрузка в печь при 500 °С, выдержка в течение часа;
- нагрев до 820–840 °С, выдержка 15–20 с на 1 мм толщины при нагреве в соляной ванне и 25–30 с для нагрева в печи;
- охлаждение на воздухе до 900 °С;
- закалка в веретенном масле, имеющем температуру 60 °С до твердости HRC 45.

Отпуск 1 – при температуре 625–650 °С, выдержка 0,5 часа. Отпуск 2 – при температуре 500–550 °С, выдержка 15–20 минут.

Полученные вставки пресс-форм имеют светлую неокисленную поверхность шероховатостью 5–6 класса, на которой практически отсутствует обезуглероженный слой. Металлографические исследования вставок пресс-форм показали, что литая структура приближается к структуре прокатной закаленной стали (мартенситно-трооститной) с микротвердостью 482–569 НВ.

При испытании отлитых вставок на прочность при разрыве было установлено, что прочность состав-

ляет $145\text{--}155 \cdot 10^7$ Па, то есть близка к показателям штампованных сталей. Ударная вязкость после термообработки образцов находится в пределах $0,514\text{--}0,778$ Дж/м², что в 1,5 раза превышает показатели такой же стали после высокотемпературной (термомеханической) обработки при 1273 К.

Термическую стойкость вставок определяли по следующим критериям: количество циклов до образования первой трещины, величина инкубационного периода (в циклах) от момента появления трещины до ее образования шириной 500 мкм, изменение формы и налипание латуни на поверхности. Первая трещина на вставке из проката стали 40Х5МФС появилась на 120-ом цикле, а инкубационный период составил 30 циклов. Однако изменение формы наблюдалось уже после 30 циклов. В вставках из литой стали 40Х5МФСЛ первая трещина появилась после 245 циклов, а инкубационный период составил 190 циклов. Изменение формы зарегистрировано после 180 циклов. Налипание латуни практически отсутствует.

Производственные испытания проходили на машинах мод. 711А07 с горячей камерой прессования. Материал отливки – латунь ЛС-59. После выполне-

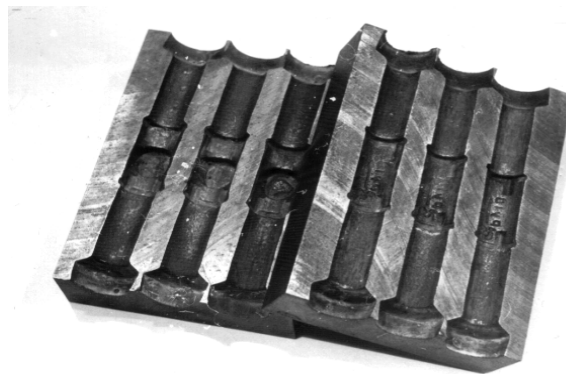
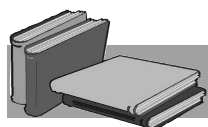


Рис. 7. Две половинки цельнолитой вставки пресс-формы

ния производственной программы (1800 годных отливок) пресс-форма находилась в рабочем состоянии и не нуждалась в ремонте. При этом ее стойкость выросла в 1,5 раза по сравнению со стойкостью механических обработанных пресс-форм.

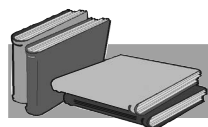
Две половинки цельнолитой вставки пресс-формы представлены на рис. 7.



ЛИТЕРАТУРА

1. Липтуга И.В., Ясюков В.В., Воронова О.И. Технология изготовления литых вставок пресс-форм. – М.: Машиностроитель. – 1989. – № 1. – С. 23–26.
2. Воронова О.И., Меланьин О.А. Влияния технологии плавки на свойства и стойкость точнолитой оснастки из сложнолегированных сталей // Международный информационно-технический журнал «Оборудование и инструмент для профессионалов. Серия: Металлообработка». – Харьков. – 2009. – № 1 (109). – С. 39–42
3. Воронова О.И. Исследование влияния комплексного модификатора на свойства и стойкость легированной стали при многократном переплаве. Материалы VIII международной конференции «Пути повышения качества и экономичности литейных процессов», г. Одесса, 2004 г. – С. 32–38.

Поступила 25.09.2018



REFERENCES

1. Liptuga, I.V., Yasiukov, V.V., Voronova, O.I. (1989). Manufacturing technology of cast inserts molds. Moscow: Mashinostroitel', no. 1, pp. 23–26 [in Russian].
2. Voronova, O.I., Melan'in, O.A. (2009). Effects of smelting technology on the properties and durability of precisely cast tooling from complex-alloyed steels. Mezhdunarodnyi informatsionno-tekhnicheskii zhurnal "Oborudovanie i instrument dlia professionallov. Serii: Metalloobrabotka". Khar'kov, no. 1 (109), pp. 39–42 [in Russian].
3. Voronova, O.I. (2004). Investigation of the effect of complex modifier on the properties and durability of alloyed steel during repeated remelting. Proceedings of the VIII International Conference "Ways to improve the quality and economic efficiency of foundry processes". Odessa, 2004, pp. 32–38 [in Russian].

Received 25.09.2018

Анотація

О.І. Воронова, приват-доцент, e-mail: olgaliptuga@ukr.net

Одеський національний політехнічний університет, м. Одеса, Україна

Технологічне рішення виготовлення формуючої оснастки за керамічними армованими стрижнями

При дослідженні способу отримання точнолітої формуючої оснастки для виготовлення корпусів водонапірної арматури запропоновано технологічне рішення отримання суцільнолітої конструкції вставки прес-форми за керамічними армованими стрижнями. Розплав піддавався комплексному впливу з метою поліпшення структури і фізико-механічних властивостей виливків, що дозволило отримати точноліту вставку прес-форми з міцністю на рівні штампованих сталей.

Ключові слова

Суцільноліта вставка прес-форми, комплексне модифікування, вакуумування, вібрація.

Summary

O.I. Voronova, privat-docent, e-mail: olgaliptuga@ukr.net

Odessa National Polytechnic University, Odessa, Ukraine

The technological decision of manufacturing of a forming tool on ceramic reinforced bars

When investigating the method of obtaining a precision casting tool for the manufacture of water-valve housings, a technological solution has been proposed for the production of a one-piece design of a mold insert on ceramic reinforced rods. The melt was subjected to a complex action to improve the structure and physico-mechanical properties of the castings, which made it possible to obtain a precision mold insert with a strength at the level of stamped steels.

Keywords

Solid mold insert, complex modification, vacuuming, vibration.

Утилизация отходов в литейном производстве

Приведены результаты лабораторных исследований по применению разных отходов, которые ранее не использовали, для легирования чугунов. Использование отходов позволило повысить свойства чугунов и увеличить коэффициент усвоения легирующих элементов в сравнении с использованием ферросплавов.

Ключевые слова: литейное производство, чугун, отливка, легирование, отходы производства, утилизация.

Улучшение качества продукции литейного производства, повышение ее надежности и долговечности является насущным требованием нашего времени. Подавляющая часть отливок изготавливается из чугуна, поэтому совершенствование его физико-механических свойств и эксплуатационных характеристик служит важным резервом в деле экономики энергетических и материальных ресурсов и интенсивного развития промышленности.

В последние годы в литейном производстве все большую актуальность приобретают вопросы создания ресурсосберегающих технологий. В настоящее время известно применение шлаков ферросплавного производства [1], цветной металлургии [2], сталелитейного передела [3–4] и практически нет данных об использовании в литейном производстве для обработки чугунных расплавов отходов специальных производств. А именно их утилизация позволит заменить дорогостоящие и дефицитные легирующие и модифицирующие материалы, такие как ниобий, титан, цирконий, гадолиний и другие, тем самым, организовав безотходные межотраслевые технологии, которые обеспечивают, с одной стороны, повышение качества отливок с одновременным уменьшением их себестоимости, а с другой – увеличение извлечения ценных компонентов в специальных производствах.

Целью работы была замена ферросплавов на основе дефицитных элементов разными отходами, которые ранее не использовали, при легировании чугуна.

С целью возможности утилизации отходов специальных производств, а также повышения термостойкости при высоком уровне износостойкости, сопротивления образованию задиrow, прочности чугуна, были проведены лабораторные исследования с использованием отходов сверхпроводящих сплавов, содержащих ниобий, олово и медь.

Серией лабораторных исследований установили, что необходимо иметь в сплаве (%мас.): углерод – 2,8–3,1; кремний – 2,8–3,5; марганец – 0,5–1,0; медь – 1,0–1,5; хром – 0,3–0,6; ниобий – 0,3–0,5; олово – 0,2–0,35; железо – остальное. Исходя из этого, для достижения цели содержание олова, ниобия и меди в отходах сверхпроводящих материалов должно находиться в соотношении 1:(1,4–1,5):(4,3–5) соответственно, то есть этим требованиям удовлетворяли отходы, содержащие, (%мас.): олово – 10–15;

ниобий – 15–20; медь – остальное. С учетом коэффициента усвоения 0,9–0,98 присадка в расплав отходов должна быть 1,6–2,5 %.

В силитовой печи выплавляли чугун, который после достижения необходимых температур (1773–1793 К) и доводки по химическому составу обрабатывали отходами сверхпроводящих материалов (величина присадки 2,0 %мас.) и после термовременной выдержки для усвоения компонентов охлаждали до 1673 К и заливали заготовки высотой 120 и диаметром 50 мм. Из этих отливок вырезали образцы для исследования свойств. Износ и сопротивление задиrow исследовали по методике Центрального научно-исследовательского института Министерства путей сообщения (ЦНИИ МПС) на машине трения с возвратно-поступательным движением МТВ-1 при реверсивном трении с жидкой смазкой.

Результаты проведенных исследований показали, что при высоком уровне прочности, износостойкости и сопротивления образованию задиrow, термостойкость сплава, полученного с использованием отходов сверхпроводящих сплавов, выше на 60 %, чем обработанного ферросплавами (табл. 1).

Коэффициент усвоения легирующих элементов из смеси сверхпроводящих сплавов составляет: 90,9–98 % – для меди и ниобия и 85,7–90,7 % – для олова, в то время как при использовании ферросплавов усвоение не превышает 85 % для меди и 81,1 % для олова. Кроме того, решается проблема утилизации, позволяющая создать практически безотходную технологию в специальном производстве. Использование исследованного способа обработки чугунных расплавов позволит повысить стойкость отливок на 25–35 %.

Кроме того, была проведена серия лабораторных исследований по установлению влияния обработки жидких чугунных расплавов отходами магнитных сплавов (химический состав, %: самарий – 25, медь – 7, цирконий – 2,7, железо – 16,5, кобальт – остальное) на структуру и свойства чугунов, затвердевавших со скоростью 0,5 град/с (табл. 2).

Микроструктура исходного чугуна характеризовалась следующим образом: графит ПГф1-ПГд350-ПГр1-ПГ10 ГОСТ 3443-87, металлическая основа Пт1(Ф)-П45(Ф55). После присадки, например, 0,5 % отходов магнитных сплавов структура изменялась: графитные включения ПГф4-ПГд90(ПГд180) – ПГр3 –

Результаты первой серии исследований

Номер плавки	Присадка отходов, %мас.	Содержание элементов, %						Свойства чугуна			
		V	Nb	Cu	Sn	Ca	Al	термостой- кость, т, см ⁻¹	износостой- кость, И, мг/100	задиристостой- кость, З, МПа	предел проч- ности при из- гибе, $\sigma_B^{изг}$ МПа
1	1,0	—	0,19	0,65	0,127	—	—	0,29	47,5	26,0	785
2	1,6	—	0,30	1,03	0,203	—	—	0,16	42,0	27,5	825
3	2,0	—	0,38	1,25	0,240	—	—	0,14	37,5	30,0	895
4	2,5	—	0,48	1,50	0,300	—	—	0,13	29,0	31,5	955
5	3,0	—	0,57	1,95	0,380	—	—	0,20	41,0	25,5	800
—	—	1,5	—	1,50	0,030	0,05	0,3	0,23	38,9	29,0	890

Примечание: При производстве отливок тепловозных цилиндрических втулок текущего производства расход феррованадия ФВд35А составляет 2,2 %, меди М1к – 1,65 %, олова – 0,033 %, силикокальция СК25 – 0,22 %, алюминия АВ97 – 0,51 %.

Таблица 2

Результаты второй серии исследований

Присадка отходов, %мас.	Темпера- тура обра- ботки, °С	Содержание хими- ческих элементов в чугуне, %			Количество структурных составляющих, %			Свойства материала отливок	
		C	Si	Mn	графит	перлит	феррит	предел прочно- сти при растяже- нии, σ_B^P , МПа	относительное удлинение, δ , %
—	—	3,70	1,10	0,59	9,9	53,6	36,5	580	4,0
0,25	1450	3,77	1,02	0,55	9,5	30,0	60,5	560	5,6
0,5	1450	3,69	1,12	0,54	11,1	3,4	85,5	590	6,2
1,0	1450	3,71	1,04	0,55	10,9	0,5	88,6	570	6,7

ПГ12, металлическая основа Ф, Пт1-П6(Ф94), а после присадки 1 % отходов графит характеризовался баллами ПГФ2 -ПГД45(ПГД180)-ПГР7 - ПГ12, металличе-
ская основа Ф (Пт1) – П6(Ф94). Таким образом, при добавке отходов в количестве 0,5–1 % и более выделе-
ние перлита практически полностью подавлялось, форма включений графита изменялась: усиливалось разветвление, и уменьшался поперечный рост.

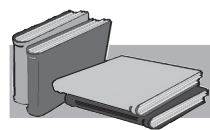
Итак, обработка чугуна, охлаждавшегося со скоростью 0,5 град/с отходами магнитных сплавов, позволила установить ярко выраженное их ферритизирующее влияние на металлическую матрицу и диспергирующее – на графитные включения, что и приводило к увеличению относительного удлинения ~ на 50 % по сравнению с исходным состоянием чугуна при практически такой же прочности.

Кроме того, были проведены дополнительные лабораторные исследования по обработке чугунного расплава смесью из отходов магнитных сплавов, со-

державшей модифицирующие и легирующие компоненты и обеспечивавшей повышение прочностных свойств при высоком уровне пластических в литом состоянии без термической обработки. В составе смеси отходов содержание самария и кобальта находилось в соотношении 1:(1,5–3), а присадка в расплав – 0,9–1,2 %мас. В результате были получены образцы чугунов с высокой пластичностью δ 9,8–10% при повышенной прочности.

Выводы

Применение отходов разных производств для легирования чугунов позволило повысить их свойства, увеличить коэффициент усвоения легирующих элементов в сравнении с использованием ферросплавов, что в комплексе с низкой ценой указанных отходов позволит снизить стоимость обработки расплавов, а также повысить стойкость отливок.

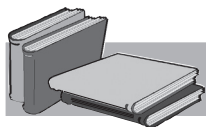


ЛИТЕРАТУРА

1. Колотило Е.В., Иванова Л.Х., Разумный П.С. Структура и свойства чугунов, модифицированных шлаками с оксидами // Неметаллические включения и газы в литейных сплавах: V Респ. науч.-техн. конф. Запорожье, 6–8 сентября 1988 г. – Запорожье, 1988. – С. 225–226.
2. Люндовский Ю.И., Черепинский Л.Б., Федьков В.А., Федьков Г.А. Применение отходов титаномагниевого производства для модифицирования стального и чугунного литья // Цветная металлургия. – 1983. – № 22. – С. 30–40.

3. Худокормов Д.Н., Василенко В.П., Слуцкий А.Г., Леках С.Н. Плавка серых чугунов с ванадийсодержащей шлакометаллической фракцией // *Литейное производство*. – 1982. – № 9. – С. 45.
4. Леках С.Н., Слуцкий А.Г., Трибушевский В.Л. Легирование чугуна из шлаковой фазы // *Литейное производство*. – 1998. – № 10. – С. 8.

Поступила 03.10.2018



REFERENCES

1. Kolotilo, Ye.V., Ivanova, L.Kh., Razumnyi, P.S. (1988). Structure and properties of cast iron, modified by slag with oxides. Non-metallic inclusions and gases in cast alloys: V Rep. scientific and technical conf., Zaporizhia, 6–8 September 1988. Zaporozh'e, pp. 225–226 [in Russian].
2. Liundovskiy, Yu.L., Cherepinskiy, L.B., Fed'kov, V.A., Fed'kov, G.A. (1983). The use of wastes of titanium production for the modification of steel and iron casting. *Tsvetnaya metallurgiya*, no. 22, pp. 30–40 [in Russian].
3. Khudokormov, D.N., Vasilenko, V.P., Slutskiy, A.G., Lekakh, S.N. (1982). Melting of gray cast iron with vanadium-containing slag metal fraction. *Liteinoe proizvodstvo*, no. 9, p. 45 [in Russian].
4. Lekakh, S.N., Slutskiy, A.G., Tribushevskiy, V.L. (1998). Alloying of cast iron from the slag phase. *Liteinoe proizvodstvo*, no. 10, p. 8 [in Russian].

Received 03.10.2018

Анотація

Л.Х. Іванова, д-р техн. наук, проф., професор НМетАУ,
e-mail: ivanovalitvo@gmail.com

*Національна металургійна академія України (НМетАУ), м. Дніпро,
Україна*

Утилізація відходів у ливарному виробництві

Наведено результати лабораторних досліджень із застосування різних відходів, які раніше не використовували, для легування чавунів. Використання відходів дозволило підвищити властивості чавунів та збільшити коефіцієнт засвоєння легувальних елементів у порівнянні з використанням феросплавів.

Ключові слова

Ливарне виробництво, чавун, виливок, легування, відходи виробництва, утилізація.

Summary

L.Kh. Ivanova, Doctor of Engineering Sciences, Prof., Professor NMetAU,
e-mail: ivanovalitvo@gmail.com

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

Wastes disposal in foundry

The results of laboratory studies on the use of various wastes, that have not previously been used for alloying cast irons, are given. The use of wastes allowed to improve the properties of cast irons and to increase the rate of mastering of alloying elements in comparison with the use of ferroalloys.

Keywords

Foundry, cast iron, casting, alloying, production wastes, disposal.

Kyung-Hyun Kim¹, Ph.D., Principal Researcher, e-mail: khkim3332@hanmail.net

Sim Hyum Suk², President, e-mail: hs8388@dsca.co.kr

В.Н. Цуркин³, канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотр., e-mail: dpta@iipt.com.ua

А.В. Иванов³, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., e-mail: artiomsan@gmail.com

А.Д. Зайченко³, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., e-mail: a.d.zaichenko@gmail.com

А.А. Жданов³, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., e-mail: zhdanoff.aleksander@gmail.com

Н.В. Честных³, мл. науч. сотр., e-mail: dpta42@gmail.com

¹Korea Institute of Materials Science, Changwon, Korea

²Dongsan Tech Co., Ltd, Changwon, Korea

³Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, г. Николаев, Украина

Влияние энергетической обработки расплава на механические свойства алюминиевого сплава В95пч

Для обработки расплава сплава В95пч использованы различные методы: реагентами, энергетически и комплексно. При энергетическом воздействии использовали три режима электрического тока (переменный, постоянный пульсирующий и импульсный), а также электрогидравлическую обработку. При определенных параметрах импульсного электрического тока после обработки реагентами получено увеличение σ_b более чем в 3 раза. Микроструктура претерпевает позитивные изменения в контексте ее модифицирования, характеризуется однородностью.

Ключевые слова: расплав, реагентная обработка, энергетическая обработка, микроструктура, свойства.

Из деформируемых сплавов системы Al-Zn-Mg-Cu полуфабрикаты получают методом непрерывной разливки. Проблемы качества при этом решают как доводкой расплава в печи или в промежуточном ковше, так и на последующих этапах кристаллизации и твердения, а также при термообработке уже в твердом состоянии. На первом этапе можно использовать реагентные методы обработки, вводя различные добавки химических элементов, а также методы энергетической обработки, воздействуя на расплав полями различной физической природы. Как известно, металлические системы обладают признаками наследственности, поэтому обработка расплава играет важную роль при решении проблемы повышения качества конечного продукта. Прежде всего, это повышение служебных свойств за счет модифицирования структуры и дегазации сплава. В этом плане актуальной является задача повышения показателей качества полуфабриката после непрерывной разливки, что в дальнейшем приведет к требуемым показателям качества готовых к эксплуатации изделий.

Цель данной работы – показать функциональные возможности обработки расплава сплава системы Al-Zn-Mg-Cu при пропускании электрического тока и его электрогидроимпульсной обработки в повышении показателей качества литого полуфабриката.

Заявленные в цели работы методы энергетической обработки хорошо себя зарекомендовали при воздействии на литейные алюминиевые расплавы [1–3]. В случае деформируемых сплавов функциональные возможности этих методов мало изучены. Поэтому в данной работе сделана попытка с по-

мощью одного экспериментального стенда изучить влияние на расплав различных принципов энергетической обработки, в том числе в комплексе с реагентной обработкой.

Выплавку сплава В95пч одинаковой массы (400 г) проводили в шахтной печи сопротивления при температуре 740 °С. После изотермической выдержки в течение 15 минут проводили обработку или переменным током, или выпрямленным пульсирующим током, или высоковольтным импульсным током. Также использовали электрогидроимпульсную обработку (ЭГИО). Для электротокерной обработки (ЭТО) использовали параллельные электроды, для ЭГИО – титановый волновод. Варьировали время обработки и частоту следования импульсов при обработке импульсным током и ЭГИО. Энергетические характеристики воздействия выдерживали постоянными.

Кроме того, выполняли реагентную обработку лигатурой AlTi5B1 и солью NaCl, которые вводили колыбельником с перемешиванием после термической выдержки. Комплексную обработку расплава выполняли по схеме: изотермическая выдержка – реагентная обработка – энергетическая обработка.

Все виды обработок выполняли в печи, выдерживая температуру выплавки. Заливку выполняли при температуре 720 °С в две формы. Первая – цилиндрический кокиль с температурой окружающей среды. Вторая форма предназначалась для получения образцов, которые использовали для изучения свойств (σ_b и δ), она предварительно нагревалась до 220 °С. Таким образом, мы имели две скорости охлаждения: 30 и 6 °С/сек, соответственно.

Анализировали параметры микроструктуры по методикам, изложенным в работе [4]. Значения σ_B и δ определяли на стандартных образцах по ГОСТ 1497-84. Твердость определяли методом Бринеля.

Всего выполнено 62 плавки. Результаты, которые показывают сравнение функциональных возможностей описанных методов обработки, представлены в таблице. Отметим, что сплавы системы Al-Zn-Mg-Cu в литом состоянии имеют значения σ_B в 3–4 раза меньше, чем после деформирования и термообработки, а значения δ не превышают 2 % [5]. Значения же уровня твердости для сплава В95 в литом состоянии, полученные в работе, соответствуют данным работы [6].

На рис. 1 для примера показаны микроструктуры некоторых образцов.

Сравнение исследуемых методов обработки расплава показало, что при выбранных параметрах воздействия, обработка переменным током не показала ожидаемого эффекта ни самостоятельно, ни в комплексе с реагентной. Наилучший результат по прочности получен после обработки импульсным током в комплексе с реагентной обработкой. ЭГИО показала промежуточный результат между обработкой импульсами тока и реагентной. На рис. 2 приведены

сравнительные данные по прочности образцов после различных методов обработки. После комплексной обработки с ЭГИО или с импульсным током, структура становится более упорядоченной, зерна α -фазы принимают более округлую форму без резких изломов, колонии эвтектики утончаются. Такой результат не зависит от скорости охлаждения в обозначенных ранее пределах.

Идея и цель исследований не предусматривали определения технологических условий и параметров комплексной обработки. Но, как показывают полу-

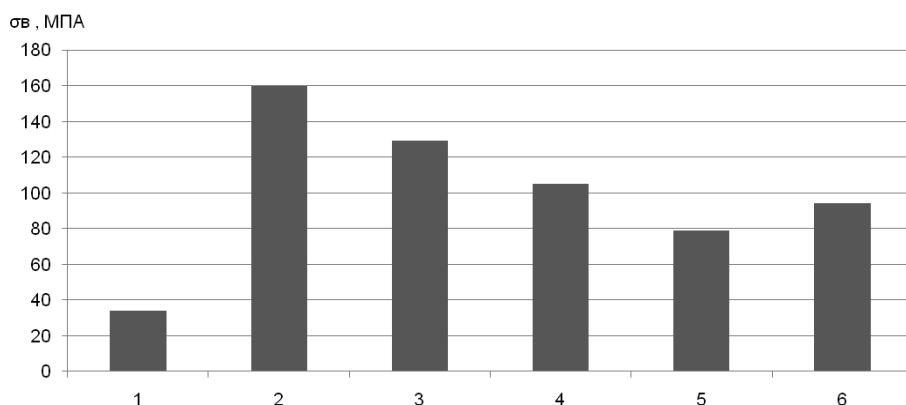
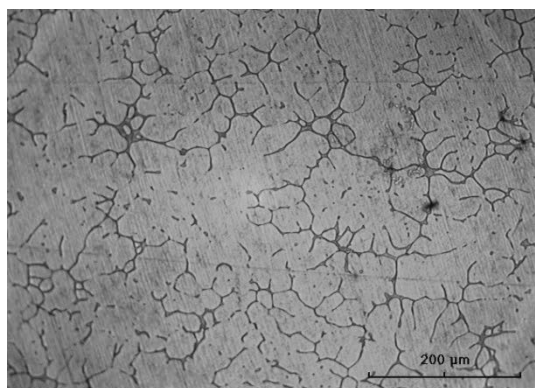
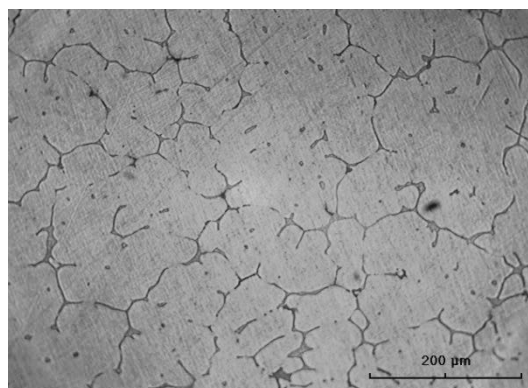


Рис. 2. Гистограмма величин прочности (σ_B), полученных в образцах, подвергнутых различным способам обработки расплава сплава В95пч: 1 – без обработки; 2 – после термообработки литого образца (№ 827/2); 3 – ИЭТО после обработки лигатурой NaCl+AlTi5B1; 4 – ЭГИО после обработки лигатурой NaCl+AlTi5B1; 5 – обработка AlTi5B1; 6 – обработка NaCl+AlTi5B1

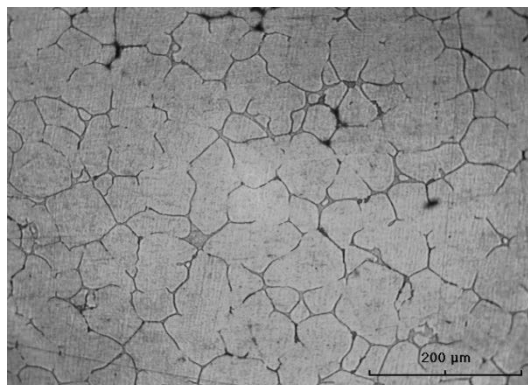
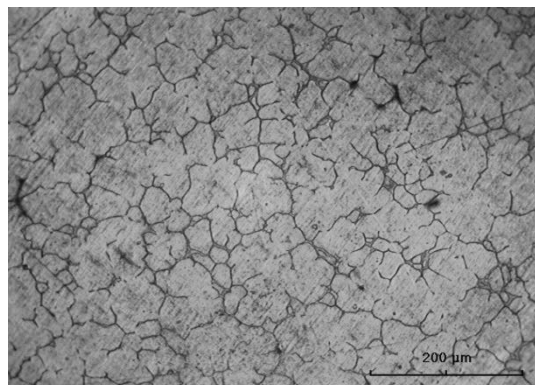
Быстрое охлаждение



Медленное охлаждение



а



б

Рис. 1. Микроструктура образцов: а – без обработки; б – после обработки: NaCl (1%) + AlTi5B1 (0,2% Ti) + ИЭТО ($W_0 = 88$ Дж; $f = 2$ Гц; $\tau = 4$ минуты)

Результаты экспериментов

№	Методы обра- ботки	Показатели структуры				Проч- ность σ _в , МПа	Относи- тельное удлинение δ _б , %	Относи- тельное сужение ψ, %	Твер- дость НВ
		Микроструктура, размер зерна		Пористость					
		быстрое охлаждение (30 °C/c)	медленное охлажде- ние (6 °C/c)	быстрое ох- лаждение (30 °C/c)	медленное охлаждение (6 °C/c)				
1	Без обработки расплава	min = 5 мкм max = 93 мкм Эвтектика 9 %	min = 27 мкм max = 101 мкм Эвтектика 7 %	0,7	1,2	34	0	0	89
2	Без обработки расплава Термообработка в литом состо- янии	—	—	—	—	160	0	0	120
3	Обработка: ЭГИО (W ₀ = 88 Дж; f = 2 Гц; τ = 4,5 мин)	min = 4 мкм max = 60 мкм Эвтектика 9 %	min = 4 мкм max = 121 мкм Эвтектика 12 %	0,4	1,6	106	2	0	98
4	Обработка: NaCl (1%) + AlTi5B1 (0,2% Ti) + ЭГИО (W ₀ = 88 Дж; f = 2 Гц; τ = 4,5 мин)	min = 3мкм max = 82 мкм Эвтектика 6 %	min = 5 мкм max = 116 мкм Эвтектика 7 %	0,1	0,5	107	1	0	98
5	Обработка: ИЭТО (W ₀ = 88 Дж; f = 2 Гц; τ = 4 мин)	min = 4 мкм max = 68 мкм Эвтектика 14 %	min = 11 мкм max = 118 мкм Эвтектика 11 %	0,1	0,4	46	0	0	107
6	Обработка: NaCl (1%) + AlTi5B1 (0,2% Ti) + ИЭТО (W ₀ = 88 Дж; f = 2 Гц; τ = 4 мин)	min = 4мкм max = 71 мкм Эвтектика 9 %	min = 5 мкм max = 103 мкм Эвтектика 12 %	0,6	0,6	129	0,8	1,2	107
7	Обработка: ППТО (I = 40 А; U = 1 В; f = 100 Гц; τ = 5 мин)	min = 3 мкм max = 52 мкм Эвтектика 12 %	min = 10 мкм max = 121 мкм Эвтектика 12 %	0,05	0,05	73	2	0	95
8	Обработка: NaCl (1%) + AlTi5B1 (0,2% Ti) + ППТО (I = 40 А; U = 1 В; τ = 5 мин)	min = 4 мкм max = 77 мкм Эвтектика 7 %	min = 21 мкм max = 98 мкм Эвтектика 6 %	0,1	0,5	64	0	0	101
9	Обработка: NaCl (1%) + AlTi5B1 (0,2% Ti)	min = 7 мкм max = 88 мкм Эвтектика 9 %	min = 16 мкм max = 100 мкм Эвтектика 11 %	0,4	0,6	94	0	0	95

Примечания:

1. В таблице использованы сокращения:

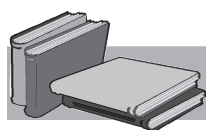
ЭГИО – электрогидроимпульсная обработка; ИЭТО – импульсная электротоксовая обработка; ППТО – обработка пульсирующим постоянным током.

Обозначения: τ – время обработки; W_0 – запасаемая энергия; f – частота следования импульсов или частота импульсного тока; I – сила тока в расплаве при напряжении U .

2. Образец № 827/2 подвергался термообработке в литом состоянии по схеме (требования ВИАМ № 747-59: закалка при температуре 470 ± 5 °C, выдержка 60 мин, охлаждение в проточной воде при температуре 30 °C; старение при температуре 140 ± 5 °C, время выдержки 16 ч, охлаждение на воздухе).

ченые результаты лабораторных экспериментов, комплексная обработка позволила практически выйти на уровень прочности образца после термообра-

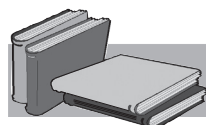
ботки, что показывает инновационную перспективу изучаемых методов обработки.



ЛИТЕРАТУРА

1. Ivanov A.V., Sinchuk A.V., Tsurkin V.N. Electric current treatment of liquid and crystallizing alloys in casting technologies // *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. – 2011. – № 5. – P. 456–464.
2. Цуркин В.Н. Проблемы и методы электротоковой обработки расплава в технологиях литейного производства // *Процессы литья*. – 2015. – № 5. – С. 3–11.
3. 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.
4. Салтыков С.А. Стереометрическая металлография. – М.: Металлургия, 1984. – 528 с.
5. Мондольфо Л.Ф. Структура и свойства алюминиевых сплавов. – М.: Металлургия, 1979. – 640 с.
6. Кулініч А.А., Горелкін Д.М., Тітаренко А.О., Небога Д.В., Ясир Д.В. Вплив лігатури AlTi6Cl на структуру та твердість сплаву B95 // Міжнародна наукова конференція «Матеріали для роботи в екстремальних умовах – 6». – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2016. – С. 280–281.

Поступила 19.10.2018



REFERENCES

1. Ivanov, A.V., Sinchuk, A.V., Tsurkin, V.N. (2011). Electric current treatment of liquid and crystallizing alloys in casting technologies. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, no. 5, pp. 456–464 [in English].
2. Tsurkin, V.N. (2015). Problems and methods of the electric current treatment of melt in casting technologies. *Casting processes*, no. 5, pp. 3–11 [in Russian].
3. 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].
4. Saltykov, S.A. (1984). Stereometric metallography. Moscow: Metallurgiya, 528 p. [in Russian].
5. Mondolfo, L.F. (1979). Aluminum alloys: Structure and Properties. Moscow: Metallurgiya, 640 p. [in Russian].
6. Kulinich, A.A., Gorelkin, D.M., Titarenko, A.O., Neboga, D.V., Yasir, D.V. (2016). Influence of AlTi6Cl ligatures on the structure and hardness of the alloy B95. International scientific conference “Materials for use in extreme conditions – 6”. Kiev: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, pp. 280–281 [in Ukrainian].

Received 19.10.2018

Анотація

Kyung-Hyun Kim¹, Ph.D., Principal Reseacher, e-mail: khkim3332@hanmail.net; **Sim Hyum Suk**², President, e-mail: hs8388@dscast.co.kr; **В.М. Цуркін**³, канд. фіз.-мат. наук, пров. наук. співр., e-mail: dpta@ipt.com.ua; **А.В. Іванов**³, канд. техн. наук, ст. наук. співр., e-mail: artiomsan@gmail.com; **А.Д. Зайченко**³, канд. техн. наук, ст. наук. співр., e-mail: a.d.zaichenko@gmail.com; **О.О. Жданов**³, канд. техн. наук, ст. наук. співр., e-mail: zhdanoff.aleksander@gmail.com; **М.В. Честних**³, мол. наук. співр., e-mail: dpta42@gmail.com

¹Korea Institute of Materials Science, Changwon, Korea

²Dongsan Tech Co., Ltd, Changwon, Korea

³Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України, м. Миколаїв, Україна

Вплив енергетичної обробки розплаву на механічні властивості алюмінієвого сплаву В95пч

Для обробки розплаву сплаву В95пч використано різні методи: реагентами, енергетично та комплексно. При енергетичному впливі використано три режими електричного струму (змінний, постійний пульсуючий та імпульсний), а також електрогідравлічну обробку. При визначених параметрах імпульсного електричного струму після обробки реагентами отримано збільшення σ_b більш ніж у три рази. Мікроструктура зазнає позитивних змін у контексті модифікування, характеризується однорідністю.

Ключові слова

Розплав, реагентна обробка, енергетична обробка, мікроструктура, властивості.

Summary

Kyung-Hyun Kim¹, Ph.D., Principal Reseacher, e-mail: khkim3332@hanmail.net; **Sim Hyum Suk**², President, e-mail: hs8388@dscast.co.kr; **V.N. Tsurkin**³, Candidate of Physico-mathematical Sciences, Principal researcher, e-mail: dpta@iippt.com.ua; **A.V. Ivanov**³, Candidate of Engineering Sciences, Senior Researcher, e-mail: artiomsan@gmail.com; **A.D. Zaichenko**³, Candidate of Engineering Sciences, Senior Researcher, e-mail: a.d.zaichenko@gmail.com; **A.A. Zhdanov**³, Candidate of Engineering Sciences, Senior Researcher, e-mail: zhdanoff.aleksander@gmail.com; **N.V. Chestnykh**³, Junior Researcher, e-mail: dpta42@gmail.com

¹Korea Institute of Materials Science, Changwon, Korea

²Dongsan Tech Co., Ltd, Changwon, Korea

³Institute of pulse processes and technologies of NAS of Ukraine, Mykolayiv, Ukraine

Effect of energy treatment of the melt on the mechanical properties of the aluminum alloy В95пч

Various principles of treatment of the В95пч alloy melt were used: with reagents, energy treatment and in a complex way. In the energy treatment three modes of electric current were used (alternating current, direct pulsating current and pulse current), and electrohydropulse treatment. In certain parameters of the pulse electric current after treatment with reagents, an increase of σ_b more than 3 times is obtained. The microstructure is undergoing positive changes in the view of modification, characterized by homogeneity.

Keywords

Melt, reagent treatment, energy treatment, microstructure, properties.

ЗМІСТ

Назюта Л.Ю., Тарасюк Л.І. Металургійна освіта. Проблеми і рішення.	3
Ярошевський С.Л., Кочура В.В., Кузнєцов О.М., Шульга І.В., Хайбулаєв А.С., Афанасьєва З.К. Ефективність та ресурси пиловугільної технології виплавки чавуну.	7
Сігарьов Є.М., Недбайло М.М., Кащєєв М.А., Байдуж Ю.В. Удосконалення конструкції гарнісажної фурми та технології відновлення профілю робочого простору конвертера.	23
Губенко С.І., Парусов Е.В., Парусов О.В., Чуйко І.М. Особливості впливу неметалевих включень на механічні властивості та малоциклову довговічність сталевих канатів при експлуатації в агресивних середовищах.	31
Ковальчук О.Г., Ямшинський М.М., Федоров Г.Є. Фізико-хімічні процеси у виливках при зносостійкому легуванні поверхні.	38
Лихошева В.П., Шатрава О.П., Пелікан О.А. Сучасні способи виробництва біметалевих виробів.	46
Лисенко Т.В., Тур М.П., Крейцер К.О., Козішкурт Є.М. Удосконалення обладнання та технології лиття під тиском для отримання тонкостінних виливків. . . .	54
Воронова О.І. Технологічне рішення виготовлення формоутворюючої оснастки за керамічними армованими стрижнями.	60
Іванова Л.Х. Утилізація відходів у ливарному виробництві.	65
Kyung-Hyun Kim, Sim Hyum Suk, Цуркін В.М., Іванов А.В., Зайченко А.Д., Жданов О.О., Честних М.В. Вплив енергетичної обробки розплаву на механічні властивості алюмінієвого сплаву В95пч.	68

CONTENTS

Nazyuta L.Yu., Tarasyuk L.I.

Metallurgical education. Problems and solutions. 3

Yaroshevskiy S.L., Kochura V.V., Kuznetsov A.M., Shulga I.V., Khaibulaev A.S., Afanaseva Z.K.

Efficiency and resources of ironmaking with pulverized coal injection. 7

Sigarev E.N., Nedbailo N.N., Kasheev M.A., Bayduzh Yu.V.

Improving the construction of the garnissage tuyere and technology restoring the converter working space profile. 23

Gubenko S.I., Parusov E.V., Parusov O.V., Chuiko I.N.

Specifics of the effect of non-metallic inclusions on mechanical properties and low-cyclic durability of steel ropes during operation in aggressive environment. 31

Kovalchuk A.G., Yamshinskij M.M., Fedorov G.E.

Physical-chemical processes in castings with wear-resistant surface alloying. 38

Likhoshva V.P., Shatrava A.P., Pelikan O.A.

Modern methods of manufacturing bimetallic products. 46

Lysenko T.V., Tur M.P., Kreitser K.A., Kozishkurt E.N.

Improvement of equipment and technology of injection molding for production of thin-walled castings. 54

Voronova O.I.

The technological decision of manufacturing of a forming tool on ceramic reinforced bars. 60

Ivanova L.Kh.

Wastes disposal in foundry. 65

Kyung-Hyun Kim, Sim Hyum Suk, Tsurkin V.N., Ivanov A.V., Zaichenko A.D., Zhdanov A.A., Chestnykh N.V.

Effect of energy treatment of the melt on the mechanical properties of the aluminum alloy B95пч. 68

СОГЛАШЕНИЕ О ПЕРЕДАЧЕ АВТОРАМИ ПРАВА НА ОПУБЛИКОВАНИЕ РУКОПИСИ

Мы, нижеподписавшиеся, авторы _____

рукописи _____

_____ (язык – русский)

передаем без оплаты учредителям и редколлегии журнала _____
_____ право опубликовать эту рукопись.

Мы подтверждаем, что эта публикация: не нарушает авторских прав других лиц или организаций; не была ранее опубликована (за исключением публикации в виде резюме, части опубликованной лекции, тезисов, обзора или диссертации); не передана в другие издательства для публикации; одобрена для публикации всеми соавторами, а также организацией (институтом, вузом, заводом или ответственным учреждением), в которой она выполнена; не содержит коммерческой либо государственной тайны.

Передача права на опубликование статьи охватывает исключительное право на воспроизведение и распространение статьи, включая оттиски, переводы, электронные формы (он- и офлайн) или любые иные подобные формы воспроизведения как на территории Украины, так и в странах ближнего и дальнего зарубежья.

После принятия рукописи к печати (при условии согласования всех замечаний рецензента) обязуемся опубликовать статью в течение 6-ти месяцев.

В случае необоснованной задержки публикации статьи автор (авторы) оставляет за собой право отозвать рукопись из редакции, при этом редакция теряет право на публикацию данной рукописи.

Подписи авторов

Зав. ред.-изд. сектором

(ФИО, организация, адрес, контактный тел., email)

(подпись)

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.