

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ЧОРНОЇ МЕТАЛУРГІЇ
ім.З.І.Некрасова

ISSN 2522-9117

DOI 10.52150/2522-9117-2019-33

*Присвячується 80-річчю створення
Інституту чорної металургії ім.З.І.Некрасова
Національної академії наук України*

ФУНДАМЕНТАЛЬНІ ТА ПРИКЛАДНІ ПРОБЛЕМИ ЧОРНОЇ МЕТАЛУРГІЇ

Збірник наукових праць

Випуск 33

Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii
Vypusk 33

Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy
Collection 33

Виходить щорічно. Заснований у 1995 році

2019

УДК 669.1.001.5

У збірнику викладено результати теоретичних досліджень, розробок технологій та обладнання доменного, сталеплавильного, прокатного виробництв, металознавства та термічної обробки сталі, економіки та організації виробництва. Розглянуто теоретичні основи розробки нових металургійних процесів, створення ресурсозберігаючих технологій та утилізації відходів. Представлено матеріали щодо історії розвитку Інституту та наукових досліджень, що визначають рівень вітчизняної металургії.

Для фахівців у галузі металургії.

The collection presents the results of theoretical research, development of technologies and equipment for blast furnace, steelmaking, rolling production, metal science and heat treatment of steel, economics and organization of production. The theoretical foundations of the development of new metallurgical processes, the creation of resource-saving technologies and waste management are considered. Materials are presented on the history of the Institute and scientific research that determine the level of domestic metallurgy.

For specialists in the field of metallurgy.

Редакційна колегія

д.т.н. О.І. Бабаченко (відповідальний редактор); д.т.н. С.В. Бобирь;
д.т.н. О.С. Вергун; д.т.н. В.В. Вереньов; д.т.н. С.О. Воробей;
д.т.н., проф. А.В. Гресс; д.т.н., проф. С.В. Єршов; к.т.н. В.Г. Кисляков;
к.т.н. Г.А. Кононенко; к.т.н. П.В. Крот; д.т.н., проф. В.З. Куцова;
д.т.н., проф. Г.В. Левченко; д.т.н. В.А. Луценко;
чл. кор. НАН України .В.Л. Мазур; к.т.н. О.Є. Меркулов; к.т.н. Л.С. Молчанов;
д.т.н. І.Г. Муравйова; к.т.н. О.С. Нестеров; д.т.н. О.В. Ноговіцин;
к.т.н. Е.В. Парусов; к.т.н. В.В. Піптюк; д.т.н. І.Ю. Приходько;
к.т.н. Ю.С. Семьонов; к.т.н. С.І. Семикин; д.т.н., проф. Д.Н.Тогобицька;
к.т.н. Л.Г. Тубольцев (відповідальний секретарь); к.т.н. О.Л. Чайка; ; д.т.н,
проф. А.Г. Чернятевич; д.т.н. А.Ф. Шевченко; professor, Ph.D. Andriy Milenin;
professor Sh.K. Narasimhan

Рекомендовано та затверджено до друку Вченою радою Інституту чорної металургії ім.З.І.Некрасова НАН України (протокол № 8 від 23.12.2019 р).
Рецензування статей проведено членами редакційної колегії збірника і зовнішніми рецензентами збірки.

Засновник і видавець збірки - Інститут чорної металургії НАН України
Видання зареєстровано в Державному комітеті телебачення і радіомовлення України
(Свідоцтво: Серія КВ № 7982 від 13.10.2003 р.).

ISSN 2522-9117

© Інститут чорної металургії ім.З.І.Некрасова
НАН України, 2019.

49107, Україна, Дніпро, площа Академіка Стародубова, 1
Інститут чорної металургії ім.З.І.Некрасова НАН України

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2019. - Вип.33
«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33
«Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii». – 2019. – Vypusk 33

УДК 669.1.061.6

DOI 10.52150/2522-9117-2019-33-3-32

А.И.Бабаченко, д.т.н., с.н.с., директор, ORCID 0000-0003-4710-0343

Л.И.Гармаш, к.т.н., научн.сотр., ORCID 0000-0002-9540-3037

Л.Г.Тубольцев, к.т.н., с.н.с., зав.отделом, ORCID 0000-0001-6873-6685

Институт черной металлургии им.З.И.Некрасова НАН Украины

ТВОРЧЕСКИЙ ПУТЬ ИНСТИТУТА ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ НАН УКРАИНЫ. 80 ЛЕТ

Аннотация. Приведена история создания Института черной металлургии им. З.И. Некрасова Национальной академии наук Украины (ИЧМ). Представлены основные этапы в истории ИЧМ, его руководители и направления научных исследований. Основы научной тематики и авторитетные научные школы заложены выдающимися учеными Института, которые не утратили актуальности и в настоящее время. Показано, что создание и становление ИЧМ определялось необходимостью развития черной металлургии страны. Приведены истоки создания научной тематики Института, которая охватывала все основные этапы черной металлургии. Приведены крупные научные разработки, созданные сотрудниками Института впервые в мировой и отечественно практике, которые в настоящее время составляют основу мировой металлургии. Анализ показывает, что стратегическим направлением развития отечественной металлургии на перспективу является эволюционное изменение металлургических технологий. В этой связи в Институте развиваются основные направления научно-технического сопровождения технологий доменного, сталеплавленного и прокатного производства, термической обработки проката. Приведены примеры современных научных разработок Института. Направления научных исследований Института черной металлургии НАН Украины охватывают широкий круг проблем производства металлопродукции и имеют комплексный характер, что является важным преимуществом в современном металлургическом производстве. ИЧМ имеет серьезный научный потенциал новейших современных технологических и технических решений для отечественного металлургического производства, которые уже на стадии разработки адаптируются к существующим в Украине технологическим и сырьевым условиям. Большинство новых разработок по технологическому содержанию и интеллектуальному уровню реализации не уступают мировым аналогам и имеют широкое распространение в мировой практике.

Ключевые слова: черная металлургия, институт, история, научные школы, научно-техническое сопровождение металлургических технологий

Ссылка для цитирования: Бабаченко А.И., Гармаш Л.И., Тубольцев Л.Г. Творческий путь Института черной металлургии НАН Украины. 80 лет. //«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2019. - Вып.33. – С.3-32. (In Russian). DOI 10.52150/2522-9117-2019-33-3-32

История вопроса. Институт черной металлургии им. З.И.Некрасова Национальной академии наук Украины (ИЧМ) был создан в 1939 году и изначально входил в систему Академии наук Украинской ССР. В кратчайшие сроки перед Второй мировой в СССР были основаны несколько научно-исследовательских институтов металлургического профиля – Институт металлов АН СССР им. А.А. Байкова, Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии имени И.П. Бардина, Центральный институт информации черной металлургии. В них впервые в мировой практике были разработаны технологии и материалы, многие из которых представляют основу современной мировой металлургии, а страна в результате получила мощную металлургию.

В Украине таким научным центром стал ИЧМ, созданный в Харькове 9 декабря 1939 г. Основные отделы нового института возглавили академики АН УССР М.В. Луговцов, Н.Н. Доброхотов, В.Н. Свечников, Г.В. Курдюмов, члены-корреспонденты И.Н. Францевич, В.Е. Васильев, П.Т. Емельяненко, которые внесли большой вклад в изучение многих актуальных на то время проблем:

- промышленное использование керченских руд;
- разработка технологии выплавки мартеновской стали и конструкции мартеновских печей;
- исследования превращений в сталях при изотермическом нагревании в области субкритических температур;
- исследования структурных превращений при закалке стали.

Первым директором ИЧМ (1939-1952 гг.) стал академик АН УССР Максим Власович Луговцов, крупный специалист в области доменного производства (рис.1). Большой вклад академик М.В. Луговцов внес в восстановление и развитие металлургических предприятий Украины после Второй мировой войны, разработку комплексной программы использованием керченских руд, разработку технологии производства офлюсованного агломерата и выплавки в доменных печах малофосфористого переловного чугуна из криворожских руд на донецком коксе [1].

Во время Великой Отечественной войны научные сотрудники ИЧМ были мобилизованы на выполнение задач оборонного характера – увеличение выпуска металла, разработка и выпуск спецсталей, необходимых для производства танков, самолетов, боеприпасов и вооружения. В условиях огромных потерь производственных мощностей и острого недостатка топлива, сырья и людских ресурсов особое значение уделялось задачам расширения сырьевой базы металлургии. М.В. Луговцов активно работал в комиссии АН СССР по мобилизации для нужд обороны ресурсов Урала, Западной Сибири и Казахстана. И.Н. Францевич и Н.А. Воронова занимались изучением сырьевой базы

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2019. - Вип.33

«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33

ISSN 2522-9117 *«Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii». – 2019. – Vypusk 33*

Южного Урала. Для проведения комплексных анализов руд Урала в 1942г. в Свердловске на базе ИЧМ была создана химико-аналитическая лаборатория специального назначения. Но даже несмотря на приоритетность оборонных задач, во время войны не прекращалась и фундаментальные научные исследования, в Свердловске издавался журнал «Сталь». А в 1946 г. в Киеве на основании исследований, проведенных учеными в эвакуации, был выпущен первый сборник научных трудов ИЧМ [2].

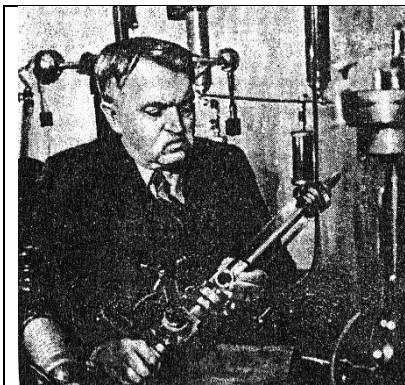


Рисунок 1 – Максим Власович Луговцов, (1948 г.)
Академик АН УССР (1939) , первый директор Института черной металлургии.

После освобождения Украины основная деятельность научных сотрудников ИЧМ была направлена на восстановление промышленности. Под руководством М.В. Луговцова уже в 1942 г. для подготовки к восстановлению коксохимической промышленности Донбасса были разработаны «Простейшие методы коксования», а в 1943 «Основные направления восстановления доменных цехов Юга в связи с интенсификацией выплавки чугуна».

В конце войны перед эвакуацией Института в Украину встал вопрос о месте базирования. До войны ИЧМ располагался в трех городах: Харькове, Днепропетровске и Киеве, не имея при этом собственной лабораторной базы. Местоположение ИЧМ имело принципиальный характер. С одной стороны, Институт должен был располагаться в непосредственной близости от металлургических предприятий Приднепровья и Донбасса, но в этом случае возникала реальная угроза превратиться в отраслевой институт. В результате в 1944 г. ИЧМ был перебазирован в Киев.

На восстановление и возобновление научной деятельности ИЧМ Академией наук УССР было выделено более 24 млн. рублей, библиотека из своих фондов передала необходимую научно-техническую литературу. Уже в 1945 году были введены в эксплуатацию новые лаборатории,

приобретено необходимое оборудование, прессы для механических испытаний, лабораторные печи, станки, автотранспорт. Лабораторная база ИЧМ в Киеве располагалась в здании по ул. Чкалова 55-б, а некоторые подразделения (отдел спецсплавов, лаборатория порошковой металлургии) временно занимали корпуса на территории музейного городка в Лавре.

Научные и технологические разработки. В первые послевоенные годы определялись приоритетные направления научной деятельности ИЧМ, формировалась структура, создавались научные подразделения и научно-лабораторная база.

В области доменного производства одной из самых значимых была разработка под руководством М.В. Луговцова новой технологии плавки с заменой обычного агломерата офлюсованным, что позволяло увеличить производительность доменной печи и уменьшить расход кокса за счет полного или частичного вывода из доменной шихты сырого известняка. Опытная правка на Днепровском металлургическом заводе (ныне г. Каменское) в 1946 г. показала хорошие результаты, однако промышленного применения мел не нашел из-за сложностей, связанных с его транспортировкой, гигроскопичностью, слеживаемостью в бункерах и другими отрицательными свойствами.

Лабораторией высококачественного чугуна на основе метода продувки жидкого металла кислородом и внедоменной десульфурации была разработана технология производства чугуна, хорошо работающего на износ в условиях трения при ударных нагрузках, что позволяло в ряде случаев заменять стальные детали литыми чугунными и давало существенную экономию металла.

Важнейшим направлением в области порошковой металлургии была разработка под руководством И.Н. Францевича в 1948-1951 годах метода получения железного порошка, при котором прокатную окалину и рудный концентрат обрабатывали комбинированным восстановителем – конвертированным природным газом и твердым углеродом.

Важные исследования по изучению равновесия в системах, образованных компонентами специальных сплавов, с построением соответствующих диаграмм состояния были выполнены в ИЧМ в 1939-1952 гг. под руководством В.Н. Свечникова и В.Н. Еременко. В дальнейшем эти работы были продолжены в Институте проблем материаловедения АН УССР, который стал головной организацией в стране по вопросам порошковой металлургии.

Некоторые научные отделы ИЧМ впоследствии стали самостоятельными научными учреждениями. В 1946 г. лаборатория металлофизики ИЧМ вместе с лабораториями Днепропетровского физико-технического института были преобразованы в самостоятельную Лабораторию металлофизики АН УССР, директором которой стал

*«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2019. – Вип.33
«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33*

ISSN 2522-9117 *«Fundamentalnye i prikladnye problemy černoj metallurgii». – 2019. – Vypusk 33*

академик Г.В. Курдюмов. В 1952 г. из состава ИЧМ выделилась лаборатория специальных сплавов, которая в 1955 г. была реорганизована в Институт металлокерамики и специальных сплавов АН УССР (впоследствии Институт проблем материаловедения АН УССР), директором которого стал один из основателей ИЧМ акад. АН УССР И.Н. Францевич.

В 1948 г. в Днепропетровске был организован филиал ИЧМ. Академик АН УССР А.П. Чекмарев возглавил новый прокатный отдел, член-корреспондент АН УССР К.П. Бунин металлографическую лабораторию, член-корреспондент АН УССР К.Ф. Стародубов лабораторию термической обработки.

В 1952 г. Президиум Академии наук УССР принял решение о перебазировании Института черной металлургии ближе к металлургическим предприятиям – в Днепропетровск, а Совет Министров УССР постановлением № 114 от 17 января 1953 г. утвердил это решение.

Двадцать пять лет (с 1953 по 1978 год) ИЧМ возглавлял Герой Социалистического труда, лауреат Ленинской и Государственной премии СССР, академик АН УССР Зот Ильич Некрасов (рис.2). Под его руководством впервые в мире были разработаны и реализованы на практике многие революционные для своего времени направления развития доменного производства [3]. Эти направления не утратили актуальности и сегодня: технология доменной плавки с использованием природного газа и обогащенного кислородом дутья; обоснование технической и экономической целесообразности строительства доменных печей большого объема; разработка технологических требований к оборудованию и автоматизации доменных печей; технология производства агломерата из богатого концентрата и др.). Под его руководством был разработан и прошел промышленное опробование новый способ производства офлюсованных углеродсодержащих железорудных брикетов.



Рисунок 2 –Зот Ильич, (1908 – 1990 гг.), доктор технических наук (1951 г.), профессор (1951 г.), академик АН УССР (1961 г.), Заслуженный деятель науки и техники УССР (1968 г.), Герой Социалистического труда (1969 г.).— Некрасов, годы. директор Института черной металлургии в 1952–1978 годы.

Однако, после переезда в Днепропетровск многие ведущие ученые остались в Киеве. Академик М.В. Луговцов возглавил лабораторию подготовки доменного сырья в составе Института горного дела АН УССР. Академик Н.Н. Доброхотов перешел в Институт использования газа в коммунальном хозяйстве и промышленности АН УССР. Академик В.Н. Свечников возглавил отдел металловедения Института металлофизики АН УССР. Член-корреспондент И.Н. Францевич был назначен руководителем лаборатории спецсплавов АН УССР.

В Днепропетровске Институту черной металлургии было передано здание по ул. Писаржевского 5 (рис.3). Работы по организации основных лабораторий (металлургии чугуна, металлургии стали, термической обработки стали и металловедения) в основном были завершены только в 1956 году.



Рисунок 3 – Первое здание ИЧМ в Днепропетровске.

После завершения переезда Института из Киева в Днепропетровск в его состав вошли следующие отделы и лаборатории:

- Отдел металлургии чугуна и прямого получения железа под руководством академика З.И. Некрасова.
- Отдел металлургии стали под руководством канд.техн.наук Г.П. Пухнаревича.
- Прокатный отдел под руководством академика АН УССР А.П. Чекмарева.
- Отдел термической обработки под руководством академика АН УССР К.Ф. Стародубова.
- Отдел металловедения под руководством члена-корреспондента АН УССР К.П. Бунина.
- Литейная группа под руководством доктора технических наук Н.А. Вороновой.
- Химико-аналитическая лаборатория под руководством кандидата химических наук М.С. Ковтуна.

В 1954 г. была организована лаборатория по проблемам механизации и автоматизации металлургических агрегатов под руководством чл.-корр. С.Н. Кожевникова, которая в 1956 году была преобразована в отдел. В 1956 г. был основан проектно-конструкторский отдел (руководитель инженер М.С. Кофман).

Перед руководством Института и его ведущими учеными (рис.4) стояла сложная задача – создать новый институт, который бы не только работал на нужды развивающейся отечественной промышленности, но и проводил фундаментальные научные исследования в области черной металлургии, укомплектовать его высококвалифицированными научными кадрами и оснастить современной лабораторной базой.



Рисунок 4 –
Ведущие
научные
сотрудники
ИЧМ (1950-е
годы).

Направления научных исследований. Основы фундаментальных и прикладных исследований, выполняющихся в Институте, были заложены известными учеными, создавшими несколько авторитетных научных школ, которые плодотворно работают в ИЧМ и в настоящее время:

1. Теория и технологии доменной плавки, продолжающая исследования по приоритетным направлениям, определенным акад. З.И. Некрасовым.

2. Создание рациональных металлургических машин и режимов их работы, динамика электро- и гидромеханических систем приводов, автоматизация управления технологическими линиями, созданная чл.-кор. АН УССР С.Н. Кожевниковым.

3. Деформационно-термическое упрочнение конструкционных сталей, созданная академиком АН УССР К.Ф. Стародубовым.

4. Теоретические основы процессов обработки металлов давлением, созданная академиком АН УССР А.П. Чекмаревым.

5. Основы теории внедоменной десульфурации чугуна, созданная д.т.н., профессором Н. А. Вороновой.

6. Теоретические основы физико-химического моделирования процессов в металлургическом производстве, которую возглавлял д.т.н., профессор Э.В. Приходько.

После переезда в Днепропетровск ИЧМ оказался в центре развивающейся металлургии Донецко-Приднепровского региона [4]. Ученые Института участвовали в разработке и внедрении на предприятиях практически всех крупнейших технических и технологических новшеств в области черной металлургии.

В области доменного производства:

- Технология работы доменных печей с повышенным давлением колошниковога газа (завод им. Дзержинского). По этой технологии выплавлялось 70 % общесоюзного чугуна.
- Вдувание в горн доменной печи природного газа впервые в мире было опробовано на заводе им. Петровского.
- Технология интенсификации доменной плавки с применением комбинированного дутья, обогащенного кислородом, и природного газа (завод им. Дзержинского).
- Комплексное развитие металлургии Керченского региона.
- Строительство крупнейших для своего времени доменных печей объемом 1719, 2000 и 2700 м³ (Криворожский металлургический завод им. В.И. Ленина).

Основные разработки, реализованные отделом металлургии стали:

- Раскисление кипящей и спокойной стали в ковше без предварительного раскисления в мартеновской печи.
- Контроль содержания водорода в стали и ее температуры по ходу плавки.
- Новая технология выплавки конструкционных сталей в электропечах с применением кислорода.
- Устройство фильтрующих решеток в шлаковиках мартеновских печей.
- Совершенствование технологии мартеновской плавки на заводах в Макеевке и Днепропетровске.

Под руководством академика АН УССР К.Ф. Стародубова до стадии опытно-промышленной опробования были проведены работы по повышению стойкости лемехов тракторных плугов, изготовленных из хромоуглеродистой стали, которые позволили увеличить их стойкость в 5-10 раз.

В 1959 г. первыми в мировой практике учеными ИЧМ под руководством академика А.П. Чекмарева на блюминге 1150 Днепровского меткомбината (ныне г.Каменское) была освоена технология двойной прокатки слитков, позволившая увеличить производительность обжимных станов на 15-30.

В 1959 на Нижнеднепровском трубопрокатном заводе им. К. Либкнехта была запущена установка конструкции ИЧМ для закалки железнодорожных колес методом индукционного нагрева.

К концу 50-х годов XX века Институт черной металлургии АН Украины окончательно сформировался как авторитетная научная организация. Несмотря на все трудности (война, переезды, организационные проблемы) на счету ученых Института было множество научных разработок, способствующих развитию отрасли. Сформировались структура и кадровый состав, позволявшие решать все более сложные задачи отрасли.

В 1960 г. в районе Ботанического сада на участке площадью 11,5 га началось строительство того комплекса ИЧМ. В 60-х был построен лабораторный корпус ОМЧ, в начале 70-х – ОМС и ЭПМ, в 1976 – общелабораторный корпус ИЧМ (рис.5).



Учитывая необходимость развития отечественной металлургии и роль Института в укреплении и интенсификации связей с производством в феврале 1962 года Институт черной металлургии АН УССР был передан в ведомственное подчинение Государственному Комитету Совета министров СССР по черной и цветной металлургии. Это означало приоритетное развитие тех разработок, которые имели прикладное значение. ИЧМ был определен головной организацией по важнейшим направлениям:

- Интенсификация доменного производства с целью повышения производительности доменных печей.
- Разработка методов переработки руд Керченского месторождения.
- Усовершенствование и интенсификация работы мартеновских печей большой емкости.

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2019. - Вип.33

«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33

ISSN 2522-9117 «Fundamental'nye i prikladnye problemy černoј metallurgii». – 2019. – Vypusk 33

- Освоение и внедрение полуспокойных и заупоренных сталей.
- Внедрение в прокатном производстве скоростных процессов и метода бесконечной прокатки.
- Разработка и внедрение эффективных методов и средств упрочняющей термообработки проката.

На самой крупной к тому времени в мире доменной печи № 5 «Криворожстали» объемом 2002 м³ проводились исследования, направленные на изучение возможностей создания еще более крупных печей. По результатам опытной плавки на агломерате из богатого концентрата, проведенной доменщиками Института на заводе «Криворожсталь», была утверждена новая технология и принято решение о реконструкции обогатительных фабрик Кривбасса с целью выпуска концентрата с содержанием железа 64-65 %.

Впервые в мире на Днепропетровском металлургическом заводе была успешно проведена опытная плавка с заменой обычного кокса формованным, полученным из газовых и слабоспекающихся углей.

Под руководством акад. А.П. Чекмарева началась разработка крупнейшей комплексной программы «Непрерывная и бесконечная прокатка». Впервые в мировой практике была начата разработка процесса бесконечной прокатки на мелкосортных станах и в 1965 г. была получена промышленная партия проката со сварным швом.

В 1966 г. была построена первая в стране промышленная установка для термоупрочнения арматурной стали с прокатного нагрева в потоке мелкосортного стана завода «Криворожсталь».

Были продолжены работы по созданию, стандартизации, сертификации и освоению новых микролегированных полуспокойных сталей для проката повышенной и высокой прочности, соответствующих международным нормам. Были разработаны научные принципы для непрерывного литья заготовок, позволяющие выйти на новый уровень производства спокойных сталей, в частности, низко- и малокремнистого состава.

В 1967 г. впервые в мировой практике учеными Института черной металлургии под руководством академика К.Ф. Стародубова была разработана нетрадиционная энергосберегающая технология упрочнения массовых видов проката из углеродистых и низколегированных сталей в потоке прокатных станов и на Криворожском металлургическом комбинате в потоке мелкосортного стана освоено термическое упрочнение арматурной стали с использованием тепла прокатного нагрева. Результаты исследований показали возможность увеличить прочность металлопродукции разного марочного и профильного сортамента в 1,5-2,5 раза.

Продолжала совершенствоваться структура Института, строились новые лабораторные корпуса для проведения научных исследований

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2019. – Вип.33

«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33

ISSN 2522-9117 *«Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii». – 2019. – Vypusk 33*

(рис.6) , были созданы отдел патентов и научно-технической информации и отдел технической информации. Укреплялась материально-техническая база ИЧМ.



Рисунок 6 – Новые лабораторные корпуса ИЧМ – отдел металлургии чугуна, металлургии стали и прокатный отдел (1970-е годы).

В 70-е годы Институт черной металлургии продолжать выполнять важнейшие исследования, определявшие направления прогресса отрасли:

- В области доменного производства – технология плавки с использованием богатого железом концентрата; применение кислорода и природного газа; освоение доменных печей большого объема.
- В области сталеплавильного производства – совершенствование мартеновского и кислородно-конвертерного производства. совершенствование продувки жидкой ванны кислородом; создание новых марок полуспокойной стали.
- В области прокатного производства – одновременная прокатка двух слитков на обжимных станах; бесконечная прокатка на непрерывных сортовых станах; улучшение качества тонкого листа за счет установления рациональных режимов обработки валков; разработка и внедрение технологических смазочных средств.
- В области термической обработки – разработка и внедрение технологии и оборудования для термообработки проката в т.ч. и в потоке станов (круглых профилей, швеллеров, балок, цельнокатаных колес, труб большого диаметра, толстого листа, катанки).
- В области металлургического машиноведения – предпусковые исследования оборудования и систем управления крупнейшей в мире ДП-9 «Криворожстали» объемом 5000 м³.

Общий экономический эффект от внедрения на предприятиях разработок ИЧМ только в 1972 г. составил 18 млн. 580 тыс. рублей.

Впервые в мировой практике в 1970 г. на доменной печи № 3 завода «Запорожсталь» была освоена технология плавки при подаче в горн пылеугольного топлива с помощью установки конструкции ИЧМ.

На заводе им. К. Либкнехта завершено освоение разработанной ИЧМ технологии вертикальной прерывистой закалки цельнокатаных железнодорожных колес, позволяющей повысить их долговечность на 15%.

Работы ученых ИЧМ по созданию физико-химических моделей структуры металлических и шлаковых расплавов под руководством докт.техн.наук Э.В. Приходько нашли широкое применение при оптимизации промышленных процессов выплавки чугуна и стали, усовершенствовании технологии производства сортового и листового проката.

Исследования по развитию теоретических основ листопрокатного производства в кратчайшие сроки и при непосредственном участии ученых ИЧМ позволили освоить производство высококачественной листовой продукции на металлургических комбинатах им. Ильича, Череповецком, Магнитогорском, Новолипецком, Карагандинском.

С участием ученых Института была освоена проектная мощность новой крупнейшей в стране доменной печи объемом 3000 м³ ЗСМЗ. Достигнутая производительность составила 5454 т чугуна в сутки.

В 1976 г. впервые в практике доменного производства ученые ИЧМ и специалисты Новолипецкого металлургического завода провели на доменной печи №4 объемом 2000 м³ опытную плавку с доведением содержания кислорода в дутье до 40 %. Производительность печи при этом повысилась более чем на 500 тонн в сутки.

В июле 1972 года был подписан договор о сотрудничестве между ИЧМ и Криворожским металлургическим заводом, который стал для Института базовым предприятием.

Институт принял активное участие в пуске и освоении крупнейших объектов черной металлургии:

- Доменная печь № 9 завода «Криворожсталь».
- Стан 1700 холодной прокатки Карагандинского меткомбината.
- Блюминг №3 завода «Криворожсталь».
- Колесопрокатные цехи заводов Выксунского и им. К. Либкнехта.
- Отделение термообработки на Волжском трубном заводе.

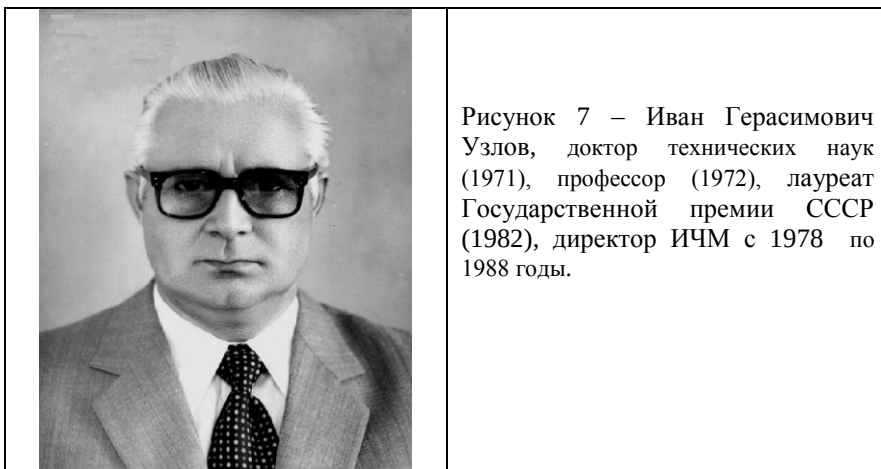
На Макеевском металлургическом заводе была реализована технология мартеновской плавки с вдуванием углеродсодержащих материалов.

С 1978 по 1988 гг. Институтом черной металлургии руководил видный ученый-металлург, доктор технических наук, профессор, лауреат Государственной премии СССР Иван Герасимович Узлов (рис.7), который внес большой вклад в развитие нового направления черной металлургии –

*«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2019. - Вип.33
«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33*

ISSN 2522-9117 *«Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii». – 2019. – Vypusk 33*

разработку энергосберегающих технологических процессов термического и термомеханического упрочнения массовых видов проката из углеродистых и низколегированных марок стали. Под его руководством решались межотраслевые задачи обеспечения железнодорожного транспорта колесами высокой надежности и долговечности на основе прогрессивных решений по их термическому упрочнению [5].



В 1980 г. впервые в отечественной практике на Западно-Сибирском металлургическом заводе с участием ученых прокатного отдела ИЧМ было освоено производство экономичных тонкостенных швеллеров, использование которых позволяет экономить до 20 % металла.

В содружестве с Укргипрометом, металлургическими комбинатами «Азовсталь» и Днепровском (ныне г. Каменское) впервые в СССР были разработаны и освоены ресурсосберегающие технологические процессы и оборудование для глубокого рафинирования стали в ковшах большого объема, что позволило создать стали нового поколения с небольшими колебаниями содержания элементов, низким содержанием вредных примесей и сниженной себестоимостью.

В 1981 г. учеными Института черной металлургии под руководством профессора Н.А. Вороновой впервые в мировой практике была успешно решена проблема удаления серы из жидкого чугуна с помощью гранулированного магния в промышленных масштабах.

Технология плавки с частичной заменой природного газа коксовым позволила получить экономию кокса 6-7 % и прирост производительности печей на 5 %.

Технология передела низкомарганцовистого чугуна в кислородных конвертерах привела к сквозной экономии марганца 2,0-3,5 кг/т стали.

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2019. – Вип.33

«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33

ISSN 2522-9117 «Fundamental'nye i prikladnye problemy černoј metallurgii». – 2019. – Vypusk 33

Промышленное опробование нагрева слитков с жидкой сердцевинкой и прокатка на блюминге 1300 «Криворожстали» на 25-30 % сократило время нагрева и обеспечило экономию 10 % топлива.

В 1985 году учеными ИЧМ была разработана технология выплавки чугуна для вводимой в эксплуатацию крупнейшей в мире доменной печи объемом 5500 м³ на Череповецком меткомбинате.

В 1987 году на 350-тонном конвертере «Азовстали» была освоена технология выплавки стали комбинированной продувкой (кислородом сверху и нейтральным газом через днище).

В 1988 г. Институт разработал и реализовал программу испытаний механизмов отечественного бесконусного загрузочного устройства и систем загрузки, оказывал научно-техническую помощь в пуске и освоении трех реконструированных доменных печей на комбинатах «Криворожсталь», «Запорожсталь» и Карагандинском.

С 1988 по 1996 г. директором ИЧМ был член-корреспондент НАН Украины Виталий Лаврентьевич Пилюшенко, лауреат Государственных премий СССР и Украины (рис.8). Основные направления его научной деятельности – развитие научных основ и методов управления микроструктурой стали при микролегировании; создание новых марок сталей и разработка новых металлургических технологий; исследование влияния технологии выплавки, разлива и пластической деформации на формирование качественных характеристик непрерывнолитой заготовки, листа и трубной заготовки; создание технологии внепечной обработки стали и чугуна, производства вакуумированной шарикоподшипниковой стали, листового проката для судостроения.



Рисунок 8 – Виталий Лаврентьевич Пилюшенко, доктор технических наук (1984 г.); профессор (1985 г.), член-корреспондент НАН Украины (1995 г.), лауреат Государственных премий СССР и Украины, директор ИЧМ с 1988 по 1996 годы.

Анализируя различные этапы развития ИЧМ, можно сказать, что поздние советский период (70-80-е годы) был годами расцвета ИЧМ, что проявлялось не только в значительных научных достижениях, но и в повседневной жизни коллектива. В это время численность ИЧМ достигла рекордной величины – около 1500 человек (вместе с ЭПМ) **рис.9**. Пятая часть сотрудников имели ученые степени – в 1990 г. в ИЧМ работали 190 к.т.н. и 14 д.т.н.

Строилось жилье для сотрудников. Интенсивно и творчески работали общественные организации, комитет комсомола, профком. Турсекция ИЧМ была одной из самых мощных в городе. В новом корпусе ЭПМ был построен спортзал. Регулярно устраивались соревнования по спортивному ориентированию, футболу, волейболу, теннису, гребле на байдарках. Практически каждый месяц в ИЧМ выступали самые известные и популярные актеры СССР (О.Янковский, С.Шакуров, Г.Тараторкин, В.Соломин, З.Гердт и др.).

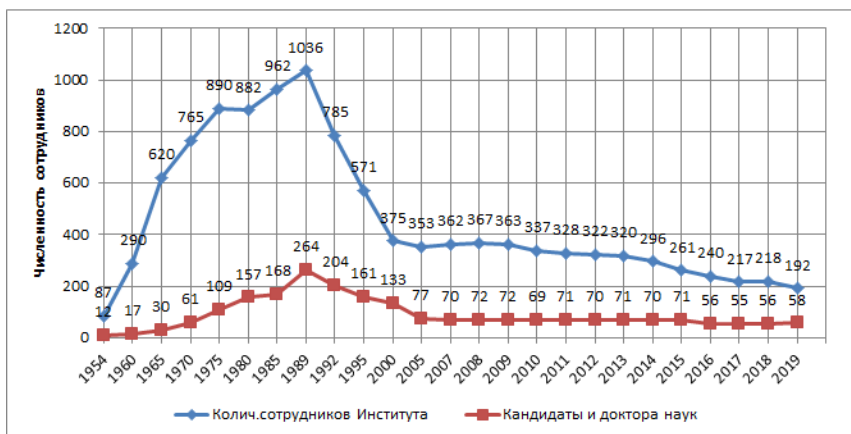


Рисунок 9 – Изменение численности сотрудников ИЧМ. ● - общая численность; ■ - количество к.т.н. и д.т.н.

После распада СССР и обретения Украиной независимости в начале 90-х политическая и экономическая ситуация в стране очень сильно изменились. Переход от тотально плановой системы к рыночной экономике вызвал ряд негативных последствий – спад производства, безработица, резкое ухудшение материального положения основной части населения, неконтролируемый рост цен. По официальным данным, в 1991 инфляция в Украине составила 390% за год, в 1992 – 2100%, а в 1993 – 10256%. Повысились цены на российские энергоносители, только за 1992 цены на нефть, газ и нефтепродукты выросли в 300 раз. За 1990-1999 годы ВВП Украины сократился на 40 %.

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2019. - Вип.33

«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33

ISSN 2522-9117 «Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii». – 2019. – Vypusk 33

Все это не могло не сказаться на деятельности ИЧМ. Была разрушена отраслевая система координации научных исследований в металлургии и их финансирования, резко уменьшился объем исследований в приоритетных научных направлениях и снизилось количество внедряемых в производство научных разработок. Разрывались многие наработанные годами партнерские отношения. Если в 1992 сотрудники ИЧМ выполнили 457 хоздоговорных работ и 304 из них были внедрены на предприятиях, то к 1999 их количество уменьшилось почти в 10 раз – до 49, а внедрено было всего 13. На 1 января 1996 г. задолженность Минпрома и предприятий перед ИЧМ превышала 75 млрд.крб., а со второй половины 1996 Министерство промышленности практически прекратило финансирование НИР, что привело к существенному ухудшению финансового состояния Института. Зарплата сотрудникам выплачивалась с многомесячными задержками, были отменены доплаты за научные степени кандидатов и докторов наук.

Не выделялись средства на ремонт зданий, оборудования, закупку новой современной техники, содержание лабораторной базы и выездов на промышленные предприятия для проведения промышленных исследований. Резко сократился объем подписных изданий, компьютеры и оборудование не отвечали современным требованиям и не позволяли в полной мере выполнять исследования на должном уровне. Престиж научной деятельности упал практически до нуля. Все это привело к тому, что за 10 лет численность сотрудников ИЧМ уменьшилась в 3 раза.

Однако, несмотря на все эти по большей части объективные трудности, ИЧМ по-прежнему оставался одним из основных научно-исследовательских центров черной металлургии не только в Украине, но и в странах СНГ. Его сотрудники привлекались для решения наиболее важных и перспективных задач отрасли. В 90-е годы ИЧМ принимал участие в выполнении проекта TACIS по разработке программы развития черной металлургии Украины и в нескольких научно-технических программах Министерства науки Украины.

В изменившихся экономических условиях особое значение приобрели вопросы ресурсо- и энергосбережения, разработка способов и технологий использования вторичных сырьевых ресурсов и решения экологических проблем, разработка технологических рекомендаций для проектирования новых металлургических объектов и реконструкции существующих.

В 1993 г. приказом Министерства промышленности Украины ИЧМ был утвержден головной организацией по ряду научно-технических направлений развития черной металлургии, а общим приказом АН Украины и «Укрзалізниці» – головной организацией по вопросам создания прогрессивных видов металлопродукции и эффективного ее использования на железнодорожном транспорте. Совместно с Министерством промышленности Украины в 1994 г. была разработана

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2019. - Вип.33

«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy»». – 2019. – Collection 33

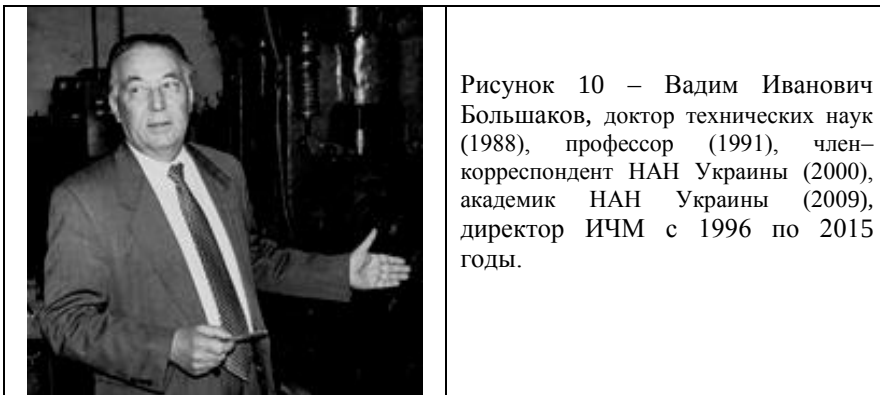
ISSN 2522-9117 *«Fundamentalnye i prikladnye problemy černoj metallurgii»». – 2019. – Vypusk 33*

Государственная научно-техническая программа «Эффективные конструкционные стали».

Перспектива развития научных исследований. Самое важное событие для ИЧМ в 90-е – возвращение в состав Академии наук Украины, что, естественно, привело к некоторому корректированию научной тематики, увеличению доли и повышению уровня фундаментальных исследований. Была частично изменена структура ИЧМ, повышена роль ученого совета и научных семинаров при формировании тематики, оценки выполнения НИР, усовершенствования подготовки научных кадров и работы аспирантуры.

Ситуация с финансированием начала улучшаться к концу 90-х годов. В 1999 г. Президиум НАН Украины разработал четкий порядок, позволявший своевременно получать средства на проведение научно-исследовательских работ и содержание лабораторной базы Института. Начало выделяться целевое финансирование на компьютеризацию и создание баз данных. Ликвидировалась задолженность по заработной плате по бюджетным работам.

С 1996 по 2015 гг. ИЧМ возглавлял академик НАН Украины Вадим Иванович Большаков (рис.10), видный советский и украинский учёный-металлург.



Исследования и разработки В.И.Большакова в области динамики металлургических машин, технологии доменной плавки, оборудования и автоматизации загрузки доменных печей внесли весомый вклад в теорию и практику металлургического производства. Под его руководством были созданы научные основы управления распределением шихты и газов в доменных печах, которые явились базой для разработки нового оборудования на доменных печах большого объема, в том числе, конвейерных шихтоподач и бесконусных загрузочных устройств.

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2019. - Вип.33
«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33

ISSN 2522-9117 «Fundamental'nye i prikladnye problemy černoј metallurgii». – 2019. – Vypusk 33

Сформирована база знаний в наименее изученной области технологии доменного процесса –взаимосвязи распределения по радиусу печи шихтовых материалов на колошнике, состава и свойств жидких фаз на уровне горна и технологических параметров плавки [6]. 90-е годы были непростым периодом в истории ИЧМ, когда основные усилия администрации в значительной мере были направлены на сохранение научного потенциала Института на должном уровне, поиск новых форм организации и проведения исследований, определение наиболее перспективных направлений научных разработок, обеспечение стабильного финансового положения, ликвидацию задолженностей по заработной плате, сохранение научных кадров и повышение их квалификации. Несмотря на все сложности, за 90-е годы 22 сотрудника ИЧМ защитили кандидатские диссертации и 8 докторские. Издавались сборники научных трудов «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии», было опубликовано около 1000 статей и 18 монографий.

Унаследовав от металлургии СССР значительный производственный и научный потенциал, Украина к началу XXI в. в научно-техническом плане в значительной степени утратила свои позиции. Прогрессивные технологии внедрялись неспешно, природоохранные методы ограничено. Оборудование устаревало и изнашивалось, реконструкции и модернизации проводились в недостаточной мере. Часть доменных печей была выведена из производства [7].

Как головная научно-исследовательская организация отрасли Институт на протяжении всей своей истории участвовал в разработке стратегических направлений развития черной металлургии. В 1993-1995 ИЧМ стал инициатором создания Концепции развития черной металлургии Украины, которая была принята Верховной Радой в 1995 году. В дальнейшем Институт активно участвовал в работе над Национальной программой развития ГМК, которая была утверждена Кабинетом Министров в 2004 году и Стратегией развития ГМК.

В них были определены основные направления сбалансированного развития горно-металлургического комплекса страны с учетом тенденций изменения внутреннего и внешнего рынков металлопродукции. Были выделены приоритеты научно-технического развития, разработки и освоения перспективных технологий и меры для проведения структурных преобразований, обоснован перечень инвестиционных проектов для структурной перестройки горно-металлургического комплекса Украины.

С начала 2000-х ситуация в ГМК начала постепенно улучшаться и к 2008 г. некоторые показатели производства металлургической продукции достигли почти доперестроечного уровня (рис. 11). По данным ОП «Металлургпром» в 2006-2007 годах капитальные инвестиции в техническое перевооружение украинских металлургических предприятий

*«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2019. - Вип.33
«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33*

ISSN 2522-9117 *«Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii». – 2019. – Vypusk 33*

впервые достигли европейского уровня. У предприятий и холдингов появились средства и возможности для модернизации производства, больше внимания стало уделяться вопросам ресурсо- и энергосбережения, экологической безопасности.

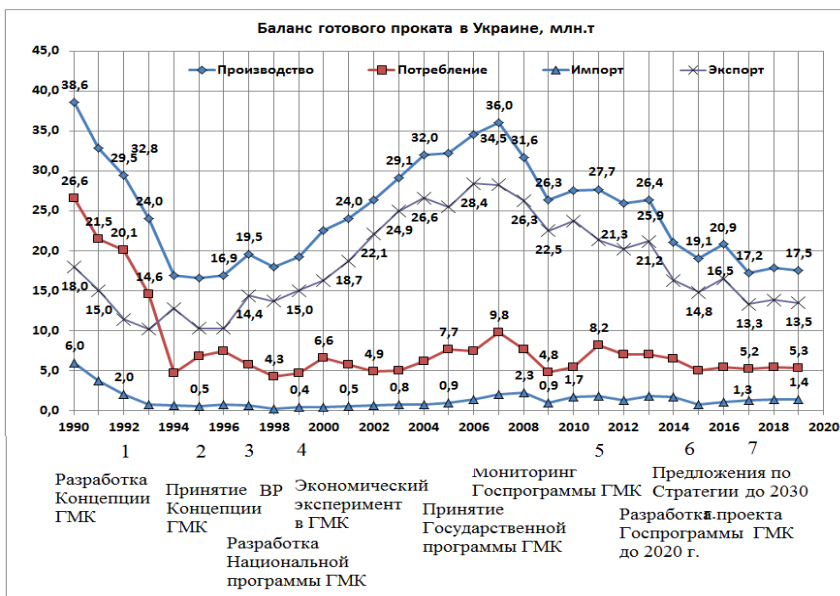


Рисунок 11 –Баланс производства, потребления, экспорта и импорта проката в Украине и мероприятия ИЧМ по реализации государственной поддержке ГМК.

Повышения конкурентоспособности и эффективности производства невозможно было добиться без разработки и внедрения новых технологий и материалов, не уступающих мировому уровню. Основными направлениями научной деятельности ИЧМ в эти годы стали:

разработка научно обоснованных приемов совершенствования технологии доменной плавки в существующих шихтовых условиях и методов контроля и управления на основе объективно контролируемой информации о параметрах и показателях процесса с использованием автоматизированных систем;

разработка новых технологических и технических решений по усовершенствованию выплавки стали заданного качества;

разработка новых ресурсосберегающих и усовершенствование существующих технологических режимов прокатки;

изучение влияния новых технологических схем производства, легирования стали, термической и термомеханической обработки на формирование структуры и свойств металлопроката массового и целевого назначения;

анализ проблем и тенденций развития металлургического производства, и подготовка рекомендаций по развитию ГМК.

Разработки ИЧМ реализовывались на всех крупнейших предприятиях Украины и стран СНГ, появились совместные проекты с Японией, Тайванем, Китаем. Реализация результатов НИР на производстве приносила дополнительное финансирование и расширяла возможности апробации результатов теоретических, расчетно-аналитических и лабораторных исследований на практике, что было особенно важно для молодых ученых, которые только начинали свою научную деятельность.

В начале 2000х годов кадровый вопрос был одним из самых острых в Институте, поскольку за последнее десятилетие XX века численность сотрудников уменьшилась почти втрое. Благодаря целенаправленной кадровой политике за период с 2001 по 2009 в ИЧМ было принято 113 молодых научных сотрудников. Практически все они закончили аспирантуру, а многие из тех, кто пришел тогда в ИЧМ, в настоящее время являются ведущими специалистами в своей отрасли, возглавляют отделы и лаборатории. Для укрепления творческих связей с ВУЗами в 1992 в ИЧМ был открыт филиал кафедры «Теория металлургических процессов» НМетАУ (на базе отдела физико-химических проблем металлургических процессов), в 2002 создан Факультет целевой подготовки научных и педагогических кадров, а в 2013 филиал кафедры «Термической обработки металлов» НМетАУ.

В настоящее время кадровый вопрос по-прежнему остается одним из самых злободневных. В последние годы практически прекратился прием молодых специалистов – за 2010-2018 в ИЧМ принято всего 20 молодых специалистов. Уходят ветераны в силу возраста или изменений в пенсионном законодательстве. В результате за последнее десятилетие численность сотрудников ИЧМ сократилась еще на треть.

В настоящее время в ИЧМ 12 научных и научно-технических отделов, административно-хозяйственные подразделения и экспериментально-производственное предприятие. Более половины научных сотрудников имеют научную степень. Работает ученый совет ИЧМ, спецсовет по защите диссертаций и совет молодых ученых. С 2016 г. Институтом руководит д.т.н. Александр Иванович Бабаченко.

К сожалению, череда финансовых кризисов 2008-2009 гг., полная приватизация предприятий черной металлургии, военные действия в Донбассе привели к тому, что объемы производства проката в Украине сократились в 2018 году до 18,36 млн. т. Отрасль характеризуется высоким уровнем физического и морального износа основных

*«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2019. - Вип.33
«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33*

ISSN 2522-9117 *«Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii». – 2019. – Vypusk 33*

производственных фондов, высоким уровнем затратности производства, технологической и технической отсталостью, высоким уровнем загрязнения окружающей среды, невысоким качеством выпускаемой продукции, преобладанием в экспортной продукции полуфабрикатов.

В настоящее время Институт черной металлургии является единственным научным центром Украины, исследования которого охватывают все переделы черной металлургии. Свою главную задачу ученые ИЧМ видят в научно-техническом обеспечении модернизации основных фондов и разработке программы технического перевооружения ГМК Украины на основе объективного анализа инновационного уровня производства черной металлургии Украины как составной части мирового производства металлопродукции [8].

ИЧМ поддерживает многолетние научные и деловые связи с крупнейшими металлургическими предприятиями Украины: «АрселорМиттал Кривой Рог», «Запорожсталь», «Азовсталь», «Интерпайп НТЗ», «Интерпайп сталь», «Никопольский завод ферросплавов» «Днепропетровский металлургический завод», «Днепропетровский металлургический комбинат», «Силур», «Евраз Сухая Балка». Серьезные комплексные работы выполняются для «Укрзалізниці». По заказу промышленных предприятий, фирм и организаций только за 2014-20018 гг. в ИЧМ выполнено 244 НДР. Результаты 100 из них внедрены на производстве (88 на украинских предприятиях, 12 – на иностранных). Средства, получаемые от выполнения хозяйственных НИР, наряду с бюджетными, являются значимым дополнительным источником финансирования, в последние годы их доля достигла 35-40% (рис. 12).

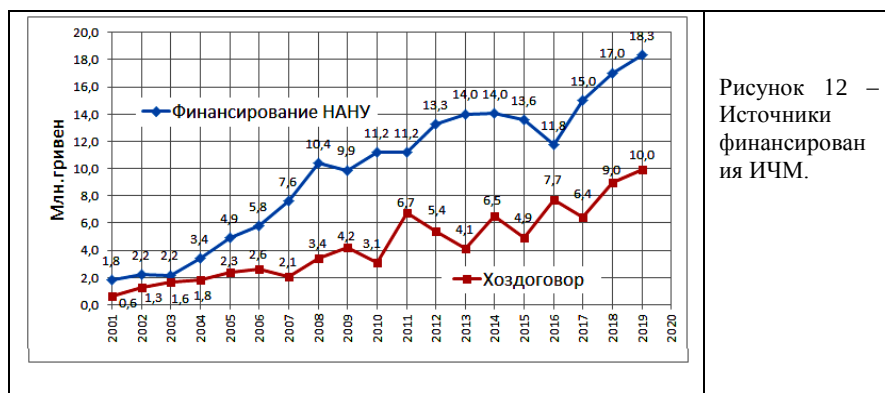


Рисунок 12 –
Источники
финансирования
ИЧМ.

На фоне осложнения или даже разрыва связей с предприятиями бывших советских республик, особое значение приобретают контакты и сотрудничество с зарубежными научными организациями и

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2019. – Вип.33

«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33

ISSN 2522-9117 «Fundamental'nye i prikladnye problemy černoј metallurgії». – 2019. – Vypusk 33

предприятиями. Многолетняя плодотворная работа связывает ИЧМ с предприятиями КНР в направлении разработки и изготовления оборудования для внепечной обработки чугуна. Совместные разработки ведутся с корпорацией «NIPPON STEEL» (Япония), предприятиями Индии, Пакистана, Ирана, Египта.

Подписаны соглашения о творческом сотрудничестве с университетами Польши, Германии и Китая, Гуандунским Союзом по международному научно-техническому сотрудничеству, фирмой "International Development Norway". Выполнен совместный проект по материаловедению с Шанхайским морским университетом.

С 2000 г. научная деятельность ИЧМ осуществляется в соответствии с основными направлениями фундаментальных и прикладных исследований, которые определены Президиумом НАН Украины:

- Физико-химия и термодинамика многокомпонентных металлических систем и жидкого состояния шлакометаллических расплавов.
- Научные основы формообразования железоуглеродистых сплавов и управления их структурой и свойствами.
- Исследование и разработка новых технологий, оборудования, систем управления в производстве чугуна, стали и проката.
- Научно-техническое сопровождение Программы развития горно-металлургического комплекса Украины.

Научно-исследовательская деятельность Института базируется на анализе современных тенденций развития мировой и отечественной черной металлургии, всестороннем анализе технологических и экономических аспектов металлургии Украины для определения перспектив ее развития. Учеными ИЧМ проводятся исследования с целью разработки новейших металлургических технологий и улучшения качества продукции, мероприятий ресурсо- и энергосбережения, улучшения экологического состояния окружающей среды:

- обеспечение эффективной энергосберегающей технологии выплавки чугуна;
- развитие теории и практики процессов окускования железо-флюсовых и углеродсодержащих металлургических отходов в аглодоменном производстве;
- разработка рациональных режимов загрузки и мероприятий по совершенствованию оборудования систем загрузки доменных печей;
- освоение технологии вдувания пылеугольного топлива в доменные печи;
- разработка и освоение промышленного технологического процесса особо глубокой десульфурации чугуна;

- разработка ресурсо- и энергосберегающей технологии конвертерной плавки стали, основанной на использовании электрической энергии малой удельной мощности;
- разработка сквозной технологии получения стали стабильного химического состава в металлургическом комплексе "доменная печь - внепечная обработка чугуна - кислородный конвертер - агрегаты ковшового обработки стали";
- совершенствование технологии прокатного производства;
- совершенствование технологий деформационно-термической обработки стали;
- совершенствование технологии производства и термического упрочнения металлопродукции железнодорожного назначения;
- создание технологий и оборудования для окускования мелкофракционных материалов брикетированием;
- разработка новых химических составов сталей массового применения, в том числе, высокопрочных.

В области исследований физико-химических и термодинамических процессов в многокомпонентных металлических системах созданы информационно-аналитические системы прогнозирования и управления, включающие базы данных железорудных материалов, шлаковых и металлических расплавов и модели для прогнозирования свойств различных металлургических систем.

Продолжаются исследования в области теории и технологии доменной плавки, основы которых заложили академики З. И. Некрасов и В.И.Большаков. Разработаны комплекс технических и технологических решений для обеспечения продолжительной безопасной и экономичной работы доменных печей; технологии подготовки к доменной плавке новых видов ЖРС, в том числе, с высокой долей вторичных ресурсов; технологические приемы формирования и загрузки порций шихтовых материалов, обеспечивающих создание защитного гарнисажа в шахте печи и предотвращение ускоренного выхода фурм из строя. Созданы и внедрены на действующих доменных печах системы контроля теплового состояния, поверхности засыпи, состояния футеровки. Комплексные исследования с последующей промышленной реализацией ведутся по программе внедрения на доменных печах Украины технологии вдувания ПУТ. Разрабатывается комплексная интеллектуальная система поддержки принятия решений по управлению доменным производством.

Рекомендации ученых ИЧМ, использованные при разработке регламента задувки доменных печей после их вынужденной длительной остановки на срок, который превысил нормативный почти в 2 раза (80 и 87 суток), позволили вывести печи на проектные показатели с

сохранением огнеупорной футеровки и оборудования. Такие операции уникальны и не имеют аналогов в мировом доменном производстве.

В области внепечной обработки чугуна совместно с Институтом титана и НПО «Инфоком» разработан автоматизированный технологический комплекс внепечной десульфурации чугуна диспергированным магнием, который способен обеспечивать любое необходимое содержание серы при наименьших материальных и энергетических затратах. Разработаны оборудование и высокоэффективные технологии десульфурации, которые наряду с удалением серы позволяют очищать чугун от азота, кислорода и водорода.

В сталеплавильном переделе разработаны основные научные положения процесса конвертирования железоуглеродистого расплава с наложением на ванну электрической энергии малой мощности, технология и оборудование для конвертерной плавки с воздействием на расплав низковольтного электрического потенциала. Эта технология реализована на конвертерах завода им. Петровского и «Криворожстали». Разработан и внедрен новый способ комбинированной продувки конвертерной ванны сверху через новую конструкцию трехъярусной фурмы группой сверхзвуковых и двумя группами кислородных струй, который позволяет интенсифицировать шлакообразование и удаление фосфора при высоком содержании углерода, повысить эффективность дожигания отходящих газов и предотвратить локальный износ футеровки и интенсивное заметалливание оборудования кислородного конвертера.

В области прокатного производства фундаментальные исследования ведутся по разработке и развитию научных и технологических основ использования резерва втягивающих сил трения в очагах деформации рабочих клеток в процессе непрерывной сортовой прокатки. Созданы технология сортовой прокатки с использованием неприводных деформирующих устройств в линии непрерывных прокатных станов, непрерывной сортовой прокатки с использованием неприводных рабочих клеток, технологии многоручьевого прокатки-разделения с использованием автономных неприводных деформационно-делительных устройств. Разработаны мероприятия по повышению живучести крупногабаритных стальных валков прокатных станов на основе совершенствования технологии их деформационной и термической обработки, в том числе, в диапазоне отрицательных температур, с применением модифицированных конечно-элементных моделей и методов расчета параметров деформационных и теплофизических процессов (распределения деформации, полей скорости, температуры, внутреннего напряжения).

Созданы система автоматического регулирования плоскостности полос (САРП), с использованием бесконтактных методов измерения плоскостности и температуры, и промышленная система

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2019. – Вип.33

«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33

ISSN 2522-9117 *«Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii». – 2019. – Vypusk 33*

вибродиагностики и управления скоростью непрерывного стана холодной прокатки полос, которые не имеют аналогов в мире. Разработана технология и оборудование для криогенной обработки изделий машиностроения с целью повышения их износостойкости и эксплуатационной надежности, которая нашли применение в оборонной промышленности. На производстве внедрены разработки, обеспечивающие уменьшение обрывности полос, максимальную скорость холодной прокатки и повышение производительности.

В области материаловедения получили дальнейшее развитие научные положения по оптимизации процессов микролегирования и модифицирования сталей, созданы эффективные методы управления формированием структурного состояния и комплекса свойств при деформационно-термической обработке. Разрабатываются и внедряются в производство технологии производства железнодорожных колес с повышенным уровнем твердости и износостойкости.

Разработаны новые марки сталей и технологические параметры термической обработки железнодорожных колес и бандажей с новыми системами легирования для различных условий эксплуатации:

сталь для железнодорожных колес с содержанием углерода до 0,77%, легированная хромом и никелем, микролегированная молибденом и ванадием (320-400 HB, повышенная износостойкость). Колеса сертифицированы и соответствуют классу D по ASTM M-107 / M-108;

сталь для железнодорожных колес специального назначения марки D+ с содержанием углерода до 0,55%, легированная хромом, никелем и кремнием (высокая пластичность и устойчивость к ударным нагрузкам при отрицательных температурах).

Разработанные высокопрочные низколегированные стали и металлические изделия для грузовых вагонов позволяют снизить их массу, увеличить срок службы с 23 до 32 лет, осевую нагрузку с 23,5 до 25 тонн и обеспечить межремонтный период более чем 500000 км.

По разработкам ИЧМ производится новый вид арматурного проката, который применяется на шахтах Украины для анкерного крепления горных выработок.

Освоена технология производства катанки, подвергнутой двухстадийному охлаждению, из молибдено- и никельсодержащих марок сталей для сварочной проволоки

Разработаны новые технологические процессы деформационно-термической обработки борсодержащего бунтового проката из электростали широкого марочного сортамента, которые не имеют аналогов в Украине и находятся на уровне лучших мировых. Применение бора существенно повышает технологическую пластичность металла при волочении в метизном переделе за счет формирования эффективной структуры, снижает деформационное старение и приводит к экономии

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2019. - Вип.33

«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33

ISSN 2522-9117 *«Fundamental'nye i prikladnye problemy černoј metallurgii». – 2019. – Vypusk 33*

ресурсов за счет исключения дополнительных и промежуточных термических обработок (патентование, отжиг).

Сформирован системный подход и разработана методология выбора рациональных путей повышения производительности валковых прессов, на базе которой составлен алгоритм определения их конструктивных решений, расчета технологических и энергосиловых характеристик.

ИЧМ выполняет проекты в рамках целевых программ Национальной академии наук Украины «Фундаментальные проблемы создания материалов с заранее заданными свойствами, методов их соединения и обработки», программ «Ресурс», проекта «Разработка научных основ и системы мониторинга безопасности и эффективности эксплуатации технологического и энергетического оборудования металлургических предприятий с учетом технологических, технических и организационных факторов».

За годы своего существования в Институте создано и реализовано в промышленности множество разработок, изобретений, технических и технологических решений. Ряд наиболее масштабных отмечен правительственными наградами и премиями, в том числе, и самыми престижными – Государственными и Ленинскими.

В 1960 г. лауреатами **Ленинской премии** за широкое внедрение природного газа в доменном производстве стали академик АН УССР З.И. Некрасов и кандидат технических наук Н.И. Красавцев.

Государственные премии СССР были присуждены:

И.Н. Францевичу, А.А. Абиндеру, В.А. Разумовскому «За создание металлокерамических изделий различного назначения, а также изучение их химических, физических и механических свойств применительно к режимам их эксплуатации в машиностроении, электротехнике, атомной энергетике, авиационной и ракетной технике» (1950).

А.В. Праздникову, А.С. Ткаченко, С.Н. Кожевникову, Б.М. Климовскому «За создание и широкое внедрение в промышленность гаммы высокопроизводительных универсальных станов холодной прокатки труб с комплексом новых механизмов (1968).

И.Г. Узлову и М.Е. Шифрину «За создание и внедрение прогрессивных технологических процессов и высокоэффективного оборудования для поточного производства цельнокатаных железнодорожных колес» (1982).

А.А. Горбаневу, Г.П. Борисенко, А.М. Юнакову «За разработку и внедрение технологии производства высококачественной катанки» (1987).

Государственные премии УССР:

А.П. Чекмареву, В.И. Мелешко, В.Л. Павлову, В.Д. Чехранову «За разработку, освоение и широкое промышленное внедрение нового высокопроизводительного процесса одновременной прокатки двух слитков на крупных обжимных станах» (1970).

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2019. - Вип.33

«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33

ISSN 2522-9117 *«Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii». – 2019. – Vypusk 33*

Я.А. Шнеерову, В.А. Вихлевшуку и А.С. Стороженко «За разработку и широкое внедрение в народное хозяйство полуспокойных сталей взамен спокойных» (1972).

Н.А. Вороновой и А.Ф. Шевченко «За разработку технологии внепечной обработки чугуна гранулированным магнием» (1980).

В.В. Парусову за работу «Исследования и разработка конструкции и освоение высокопроизводительной промышленной технологии прокатки эффективных арматурных профилей малых сечений, обеспечивающих снижение расхода металла в строительстве» (1986).

Государственная премия Казахской ССР:

Г.В. Левченко «За участие в работе по освоению производства полосовой стали повышенной прочности для рам большегрузных автомобилей КАМАЗ» (1980).

Государственные премии Украины:

В.И. Большакову и В.А. Носкову «За комплекс работ по созданию научных основ, разработку и внедрение нового высоконадежного оборудования для реализации ресурсосберегающих технологий металлургического производства» (2000).

В.А. Вихлевшуку, В.А. Полякову, Ю.Т. Худику «За разработку и внедрение ресурсосберегающей технологии производства конкурентоспособного на мировом рынке арматурного проката нового поколения» (2001).

С.М. Жучкову за работу «Теория и практика нетрадиционного процесса – прокатка-разделение» присуждена (2006).

Государственная премия имени Н.Н. Доброхотова – Э.В. Приходько (2000).

Премия Национальной академии Украины им. З.И. Некрасова за цикл работ «Технологические основы нетрадиционные малококсовой и бескоксовой доменной плавки» - И.Г. Товаровскому (2003).

Орденом Ленина награжден академик АН УССР З.И. Некрасов.

Орденом Трудового Красного Знамени – К.Ф. Стародубов, А.П. Чекмарев, И.Г. Узлов, В.Д. Чехранов, Ю.Н. Таран-Жовнир.

Орденом Октябрьской Революции – К.Ф. Стародубов, Г.Г. Побегайло.

Орденом «Знак Почета» – Я.А. Шнееров, А.В. Праздников, Е.А. Козаков, А.Г. Ульянов.

Заключение. В настоящее время Институт черной металлургии является одним из ведущих научных центров Украины, продолжает выполнять работы по приоритетным направлениям, определенным Президиумом Академии наук Украины в области развития металлургических технологий, оборудования и систем автоматизированного контроля и управления. Постоянное внимание к развитию фундаментальной теории металлургических процессов и физического материаловедения, традиционно прочные связи с

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2019. – Вип.33

«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33

ISSN 2522-9117 *«Fundamental'nye i prikladnye problemy černoј metallurgii». – 2019. – Vypusk 33*

предприятиями горно-металлургического комплекса, тесное сотрудничество с научно-исследовательскими и проектными организациями Академии наук Украины и отрасли, творческий потенциал сотрудников позволяют сосредоточить усилия коллектива ИЧМ на выполнении перспективных фундаментальных разработок по основным направлениям развития металлургии и Национальной и региональных программ развития предприятий горно-металлургического комплекса Украины.

Библіографічний список

1. *Выдающиеся ученые, работавшие в Институте черной металлургии / Институт черной металлургии им. З.И.Некрасова /Под ред. В.И.Большакова. - Днепропетровск: Арт-Пресс, - 2007. – С.152-168.*
2. *Труды Института черной металлургии АН УССР. – Киев, 1946.*
3. *Можаренко Н.М.* Развитие творческого наследия ЗИ Некрасова в Институте черной металлургии //«Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии». Сб.научн.тр.ИЧМ. – 2008. – Выпуск 18. – С.440-445.
4. *Развитие металлургии в Украинской ССР. – Киев: Наук. думка, 1980. - 960с.*
5. *Бабаченко А.И.* Дороги, которые мы выбираем//«Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии». Сб.научн.тр.ИЧМ. – 2009. № 19. – С. 405-409.
6. *Вадим Иванович Большаков.* Академик НАН Украины/Сборник статей. – Днепр: Институт черной металлургии им. З.И.Некрасова НАН Украины, 2018. – 212 с.
7. *Черная металлургия России и стран СНГ в XXI веке/ Сборник научных трудов. - Москва: 1994. - 593 с.*
8. *Большаков В.И.* ИЧМ – научный центр создания, развития и освоения новых металлургических технологий/ Институт черной металлургии им. З.И.Некрасова. – Днепропетровск: «Арт-Пресс», 2009.– 448 с.

Reference

1. *Vydayushchiesya uchenyye, rabotavshiye v Institute chernoy metallurgii* [Prominent scientists who worked at the Iron and Steel Institute]. (2007). Institut chernoy metallurgii im. Z.I.Nekrasova [Iron and Steel Institute named after Z.I. Nekrasov]. V.I. Bolshakov (Ed). Dnepropetrovsk: Art-Press, 2007, pp.152-168 (in Russian).
2. *Trudy Instituta chernoy metallurgii AN USSR* [Proceedings of the Iron and Steel Institute]. (1946). *Academy of Sciences of the Ukrainian SSR*, Kiev, 1946 (in Russian).
3. *Mozharenko N.M.* (2008). *Razvitiye tvorcheskogo naslediya ZI Nekrasova v Institute chernoy metallurgii* [Development of the creative heritage of ZI Nekrasov at the Institute of Ferrous Metallurgy]. *Fundamental'nyye i prikladnyye problemy chernoy metallurgii. Sb.nauchn.tr.ICHM* [Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy. Collection of scientific articles ISI NANUJ], 2008, 18, 440-445 (in Russian).

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2019. - Вип.33

«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33

ISSN 2522-9117 «Fundamental'nye i prikladnyye problemy černoj metallurgii». – 2019. – Vypusk 33

4. Razvitiye metallurgii v Ukrainskoy SSSR [The development of metallurgy in the Ukrainian USSR]. Kiev: Science. Dumka, 1980, 960 p. (in Russian).
5. Babachenko A.I. (2009). Dorogi, kotoryye my vybirayem [The roads that we choose]. *Fundamental'nyye i prikladnyye problemy chernoy metallurgii. Sb.nauchn.tr.ICHM [Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy. Collection of scientific articles ISI NANU]*, 2009, 19, 405–409 (in Russian).
6. Vadim Ivanovich Bol'shakov. Akademik NAN Ukrainy [Vadim Ivanovich Bolshakov. Academic of NAS of Ukraine]. (2018). *Sbornik statey [Collection of articles]*. Dnipro: Iron and Steel Institute named after Z.I. Nekrasov of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2018, 212 p. (in Russian).
7. Chernaya metallurgiya Rossii i stran SNG v XXI veke [Ferrous metallurgy of Russia and the CIS countries in the XXI century]. (1994). *Sbornik nauchnykh trudov [Collection of scientific papers]*. Moscow, 1994, 593 p. (in Russian).
8. Bol'shakov V.I. (2009). *ICHM – nauchnyy tsentr sozdaniya, razvitiya i osvoyeniya novykh metallurgicheskikh tekhnologiy [ISI - Scientific Center for the Creation, Development and Development of New Metallurgical Technologies]*. Iron and Steel Institute named after Z.I. Nekrasov, Dnepropetrovsk: Art-Pres, 2009, 448 p. (in Russian).

А.І.Бабаченко, д.т.н., с.н.с., директор, ORCID 0000-0003-4710-0343

Л.І.Гармаш, к.т.н., наук.співр., ORCID 0000-0002-9540-3037

Л.Г.Тубольцев, к.т.н., с.н.с., зав.відділом, ORCID 0000-0001-6873-6685

Институт черной металлургии им.З.И.Некрасова НАН Украины

Творчий шлях Інституту чорної металургії НАН України. 80 років

Анотація. Наведено історія створення Інституту чорної металургії ім. З.І.Некрасова Національної академії наук України (ІЧМ). Представлено основні етапи в історії ІЧМ, його керівники та напрямки наукових досліджень. Основи наукової тематики і авторитетні наукові школи закладено видатними вченими Інституту, які не втратили актуальності і в даний час. Показано, що створення і становлення ІЧМ визначалося необхідністю розвитку чорної металургії країни. Наведено витоки створення наукової тематики Інституту, що охоплювала всі основні етапи чорної металургії. Наведено великі наукові розробки, створені співробітниками Інституту вперше в світовій і вітчизняної практиці, що в даний час складають основу світової металургії. Аналіз показує, що стратегічним напрямком розвитку вітчизняної металургії на перспективу є еволюційна зміна металургійних технологій. У зв'язку з цим в Інституті розвиваються основні напрямки науково-технічного супроводу технологій доменного, сталеплавильного і прокатного виробництва, термічної обробки прокату. Наведено приклади сучасних наукових розробок Інституту. Напрями наукових досліджень Інституту чорної металургії НАН України охоплюють широке коло проблем виробництва металопродукції та мають комплексний характер, що є важливою перевагою в сучасному металургійному виробництві. ІЧМ має серйозний науковий потенціал новітніх сучасних технологічних і технічних рішень для вітчизняного металургійного виробництва, що вже на стадії розробки адаптуються до існуючих в Україні технологічних і сировинних умов. Більшість нових розробок за технологічним змістом і інтелектуальному рівню реалізації не поступаються світовим аналогам та мають широке поширення в світовій практиці.

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2019. - Вип.33

«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33

ISSN 2522-9117 «Fundamental'nye i prikladnyye problemy černoј metallurgii». – 2019. – Vypusk 33

Ключові слова: чорна металургія, інститут, історія, наукові школи, науково-технічного супроводження металургійних технологій

A.I. Babachenko, Dr. Sci, Senior Researcher, Director, ORCID 0000-0003-4710-0343

L.I. Garmash, PhD, Senior Researcher, ORCID 0000-0002-9540-3037

L.G. Tuboltsev, Ph.D., Senior Researcher, Head of Department, ORCID 0000-0001-6873-6685

Iron and Steel Institute named after Z.I. Nekrasov of the NAS of Ukraine

Creative way of the Iron and Steel Institute of NAS of Ukraine. 80 years

Summary. The history of the creation of the Iron and Steel Institute named after Z.I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine (HMI). The main stages in the history of the HMI, its leaders and directions of scientific research are presented. The foundations of scientific topics and reputable scientific schools were laid by outstanding scientists of the Institute, who have not lost their relevance at the present time. It is shown that the creation and establishment of the HMI was determined by the need to develop the country's ferrous metallurgy. The origins of creating the scientific topics of the Institute, which covered all the main stages of ferrous metallurgy, are given. Major scientific developments created by the staff of the Institute for the first time in world and domestic practice, which currently form the basis of world metallurgy, are presented. The analysis shows that the strategic direction of the development of domestic metallurgy in the future is the evolutionary change in metallurgical technologies. In this regard, the Institute develops the main directions of scientific and technical support of technologies for blast furnace, steelmaking and rolling production, heat treatment of rolled products. The examples of modern scientific developments of the Institute are given. The research areas of the Institute of Ferrous Metallurgy of the National Academy of Sciences of Ukraine cover a wide range of problems in the production of metal products and are complex, which is an important advantage in modern metallurgical production. The HMI has a serious scientific potential for the latest modern technological and technical solutions for domestic metallurgical production, which at the development stage are being adapted to the existing technological and raw material conditions in Ukraine. Most of the new developments in technological content and intellectual level of implementation are not inferior to world analogues and are widespread in world practice.

Keywords: ferrous metallurgy, institute, history, scientific schools, scientific and technical support of metallurgical technologies

For citation: Babachenko A.I., Garmash L.I., Tubol'tsev L.G. Tvorcheskii put' Instituta chernoy metallurgii NAN Ukrainy. 80 let. [Creative path of the Institute of Ferrous Metallurgy of the National Academy of Sciences of Ukraine. 80 years.]. *«Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii»*. [Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy], 2019, 33. 3-32. (In Russian). DOI 10.52150/2522-9117-2019-33-3-32

Статья поступила в редакцию сборника 19.10.2019 года, прошла внутреннее и внешнее рецензирование. (Протокол заседания редакционной коллегии сборника №2 от 23 декабря 2019 года)

A.I. Babachenko, Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher, Director, ORCID 0000-0003-4710-0343

L.G. Tuboltsev, Ph.D., Senior Researcher, Head of Department, ORCID 0000-0001-9540-3037

Iron and Steel Institute named after Z.I. Nekrasov of the NAS of Ukraine

TRENDS IN THE DEVELOPMENT OF ENERGY-SAVING TECHNOLOGIES IN METALLURGY

Summary. The purpose of the analysis is to identify trends in the development of metallurgical production and the use of energy-saving metallurgical technologies. It is shown that the world continues a steady trend of increasing steel production. This indicates an increase in metal consumption in industry. Despite the downward trend in steel production in Ukraine, the attention of metallurgists to the use of energy-saving technologies has not diminished. Trends and examples of the use of energy-saving technologies in world practice in comparison with trends in domestic metallurgy are given. Perspective technologies of blast furnace, steelmaking and rolling production are shown. Their advantages and disadvantages are noted. It is shown that the production volumes of metallurgical products are closely related to the technical level of production and the structure of steel smelting. It is noted that the development trends of domestic metallurgical production on a general basis coincide with the development trends of world metallurgy. The advantages and disadvantages of domestic ferrous metallurgy are shown. The directions of scientific research of the Iron and Steel Institute named after Z.I. Nekrasov NAS of Ukraine (ISI), which correspond to global trends in the development of metallurgy and cover the whole range of problems in the production of metal products. The developments are comprehensive, which is a very important advantage in the modern world. The ISI has a serious scientific potential for the latest modern technological and technical solutions for domestic metallurgical production, which are already at the development stage adapted to existing technological and raw materials conditions and their changes. Most of the new developments in technological content and intellectual level of implementation are not inferior to world analogues.

Keywords: metallurgical production, trends, technologies, Institute of ferrous metallurgy, research, development

For citation: Babachenko A.I., Tuboltsev L.G. Trends in the development of energy-saving technologies in metallurgy. *«Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii»*. [Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy], 2019, 33. 33-42. (In English). DOI 10.52150/2522-9117-2019-33-33-42

The state of the problem. Since 2009, the world has continued a steady growth trend in steel production, which indicates an increase in the consumption of metal products in industry. Since 2011, Ukraine is gradually losing ground and reducing steel production (Figure 1).

At the same time, the attention of Ukrainian metallurgists to the use of energy-saving technologies is not weakening. The enterprises of the mining and metallurgical complex of Ukraine (MMC) in 2019 compared to 2018 reduced natural gas consumption

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2019. – Вип.33

«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33

ISSN 2522-9117 *«Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii». – 2019. – Vypusk 33*

by 2% (with a similar reduction in pig iron production), and also reduced electricity consumption by 5% (with a decrease in steel production by 1.2% and rental - by 0.9%). This indicates the close attention of metallurgists to the use of energy-saving technologies even in conditions of unstable production.

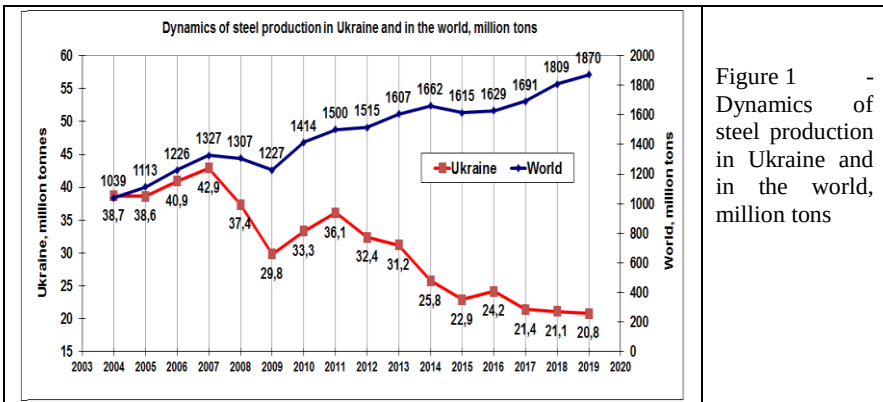


Figure 1 - Dynamics of steel production in Ukraine and in the world, million tons

The purpose of the analysis is to identify trends in the development of metallurgical production and the use of energy-saving metallurgical technologies.

Statement of the main research materials.

The indicators of production of metallurgical products are closely related to the technical level of production and the structure of steel smelting. If in Ukraine in 2004 the ratio between production volumes of converter, open-hearth and electric furnace steel was 51.3%, 45.3% and 3.4%, then in 2009 this ratio becomes 69.2%, 26.3% and 4.5%, respectively, and in 2010 - 68.7%; 25.4% and 5.9%, respectively (Figure 2).

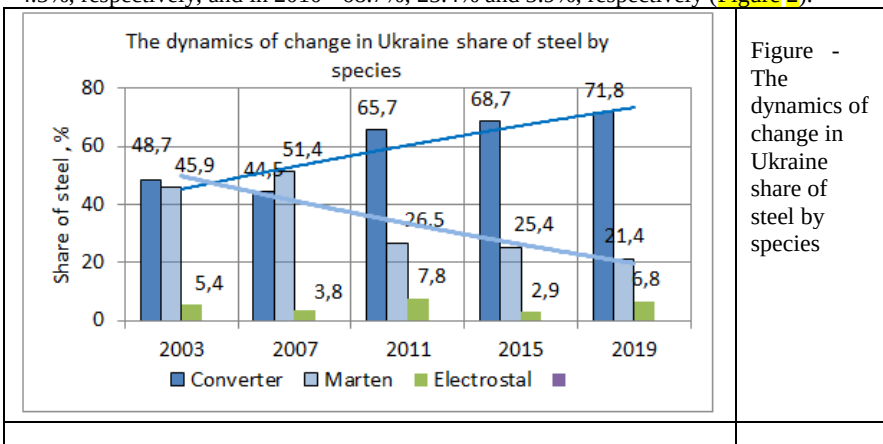


Figure - The dynamics of change in Ukraine share of steel by species

It should be noted that the upward trend in converter steel production in Ukraine is in line with global trends, while the share of open-hearth and electric steel is diametrically opposite (Figure 3). The increase in electric steel smelting in the world is

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2019. – Вип.33

«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33

ISSN 2522-9117 «Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii». – 2019. – Vypusk 33

associated with the development of steel production at mini-plants using metal scrap, while in Ukraine this method of steel smelting is used on a limited scale.

Metallurgy refers to inertial industries and the trends in its development change rather slowly [1]. However, in the advanced industrially developed foreign countries, the change in the technical level of metallurgy and the creation of new metallurgical technologies is much faster than in the CIS countries.

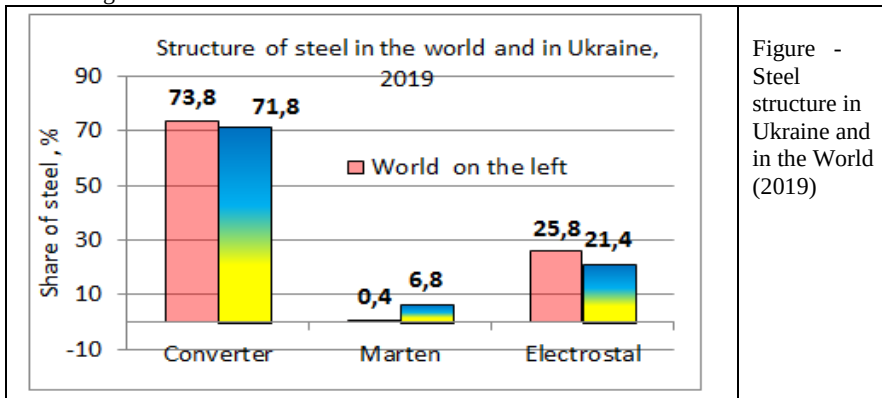


Figure - Steel structure in Ukraine and in the World (2019)

The trends in the development of metallurgical production in Ukraine in general coincide with the trends in the development of world metallurgy. The difference is the availability of our own iron ore raw material base, unique deposits of manganese ore, the presence of developed metallurgical production at integrated enterprises, the presence of highly qualified personnel and our own scientific and technical potential.

One of the main trends in the development of world metallurgy is the environmental focus when creating new and reconstructing existing facilities. Reducing the load on the environment is based on an integrated approach to solving this problem, with the main focus being on measures to reduce energy intensity. In particular, new blast furnaces abroad have a new standard of environmental protection measures regardless of the region. These measures are especially strict in Japan and some countries of Western Europe, including Germany. However, the reconstruction of the existing production with equipping it with environmental protection means is much more expensive than a similar new production.

The most energy-intensive metallurgical process is blast furnace production. General trends in the development of blast furnace production can be considered the construction of large-scale blast furnaces, the decommissioning of small-volume furnaces, the modernization of blast furnaces during overhaul, the search for the possibility of using alternative energy sources (Figure 4), the improvement of smelting technology (Figure 5) and the creation of automated control systems using models and software. Thus, in comparison with the use of pulverized coal, the technology most widely used today, the use of hot reducing gases simultaneously with hot blasting will increase the efficiency of blast furnace smelting by another 12-15% and reduce greenhouse gas emissions by 8-9%.

Currently, the operating parameters of highly efficient blast furnaces are close to the thermodynamic and economic optimum. An analysis of the trends in the

development of blast furnace production technology suggests that the scheme of the traditional method of smelting cast iron in blast furnaces using coke and alternative energy carriers is the best option for the production of cast iron and stainless steel, although other technological schemes of metallurgical production are discussed and used, in particular without using blast furnaces [2]. At present, new technologies of coke-free metallurgy have been developed, in particular technologies of direct and liquid-phase reduction of a new generation, which make it possible to use coal as energy carriers.

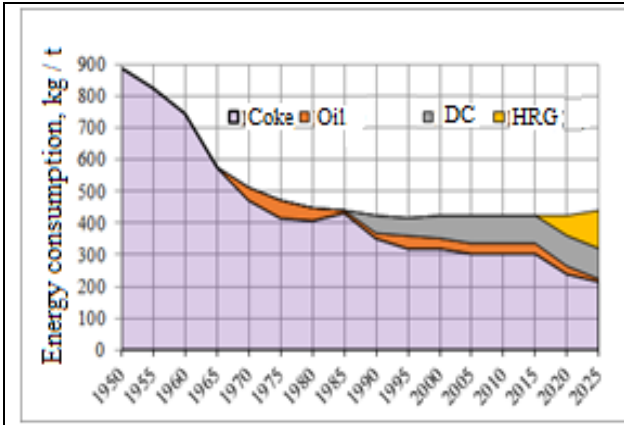


Figure 4 - Dynamics of changes in the composition and consumption of energy for BF by year (world average and forecast calculations).

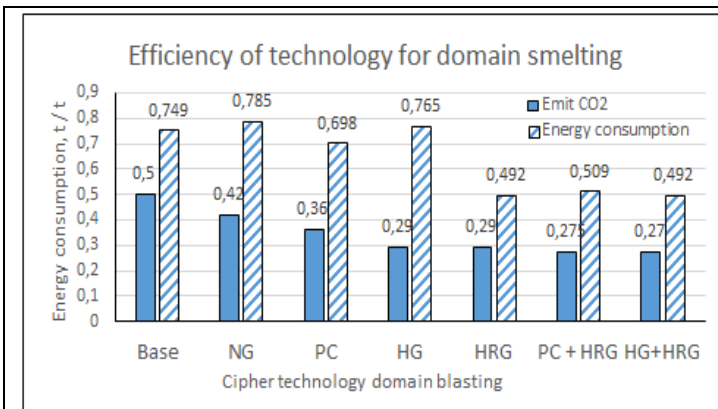


Figure 5 - Efficiency of blast furnace technologies using alternative energy sources

In Fig. 5, the following notation is used: Base - traditional blast furnace smelting; NG - blast furnace using natural gas; PC - blast furnace using pulverized coal fuel; HG - blast furnace using hot blast; HRG - blast furnace smelting using heated recirculation gases; PC + HRG blast furnace using heated reducing gases and pulverized coal; HG + HRG - blast furnace smelting using hot blast of heated reducing gases.

One of the most effective and most widely used technologies in world practice is the scheme of end-to-end steel production technologies at integrated metallurgical enterprises. At the same time, the development of electric steelmaking for the redistribution of scrap metal (in particular in the USA) contributed to a significant decrease in the production of cast iron for steel smelting (Figure 6) [3].

Steelmaking in the world is characterized by the rapid development of oxygen-converter and electric steelmaking and a significant decrease in steel production in open-hearth furnaces (Figure 7). The oxygen-converter method of steel production in the world is considered the most modern.



Figure 6 - Динамика производства чугуна и стали на примере США [3].

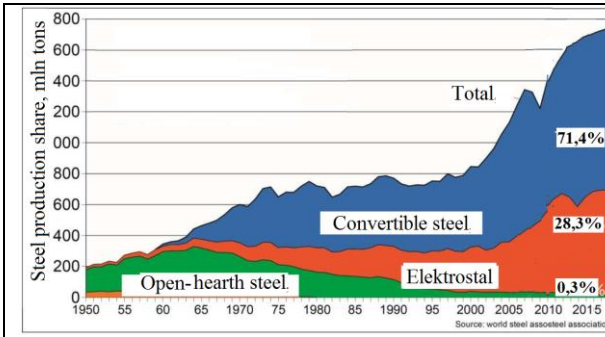


Figure 7 - World steel production by type.

The development of out-of-furnace steel processing processes has shown that it is possible to transfer part of the operations from the converter to the «ladle-furnace» unit, including the removal of gases from steel. At the same time, improving the processes of oxygen-conversion steel allows to achieve a significant reduction in the level of gases in the melt. For comparative analysis, we used the results of research on oxygen-converter smelting technology with upper purge (O_2), the technology of combined oxygen purge from above and nitrogen below ($O_2 + N_2$), the technology of combined oxygen purge from above and below ($O_2 + O_2$), and the technology of combined oxygen purge from above and purified converter gas from below ($O_2 + KG$). The results of comparing the efficiency coefficients of these technologies are shown in Figure 8.

The results show that the combined purge of the converter with nitrogen from below allows you to get the oxygen content in the melt is 30-34% less (compared with the upper blowing lance), but the nitrogen content is significantly higher than the upper blowing lance. The greatest effect was obtained when the melt was purged from below with purified converter gas, which simultaneously reduced the oxygen and nitrogen content in steel by 40–50%.

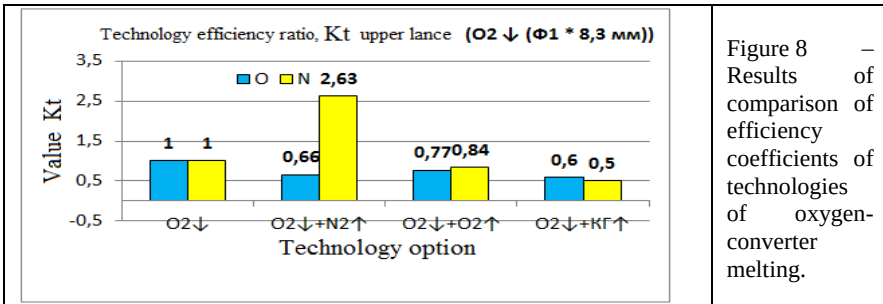


Figure 8 – Results of comparison of efficiency coefficients of technologies of oxygen-converter melting.

Rolling technology has changed little in recent years. But characterized by the improvement of equipment for the production of rolled products. [4]. Using combined processes allows us to achieve not only high energy efficiency, but also to ensure minimal greenhouse gas emissions (Figure 9).

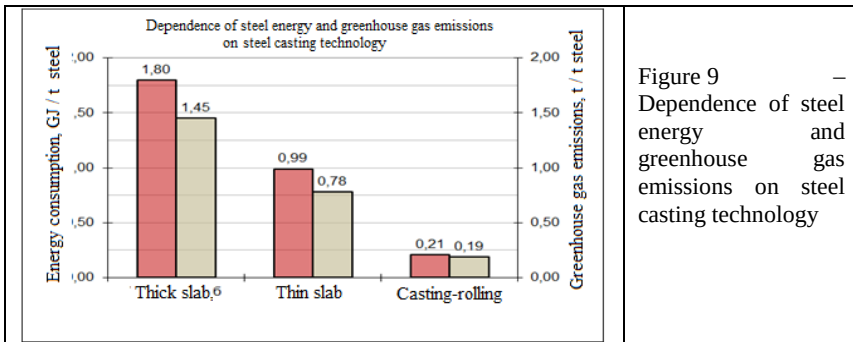


Figure 9 – Dependence of steel energy and greenhouse gas emissions on steel casting technology

The analysis showed that in MMC there are no insoluble problems of a systemic nature that can impede the successful and economically viable development of the industry, primarily due to the use of scientific research results. Here are some of the results of scientific research of the Iron and Steel Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine (ISI), implemented at metallurgical enterprises. In particular, «ArcelorMittal Kryvyi Rih MK», which was the base enterprise of the ISI prior to its sale, notes a rather high technological level of metallurgical production at the plant, which was achieved with the participation of the Institute. As acknowledged by its owners, the existing technological level of the plant is one of the highest in the company and, therefore, does not need to be improved at the moment [5].

You can also give a few more examples of ISI developments that are consistent with global trends in the development of metallurgy [6].

To reduce the energy intensity of sintering production, a study was made of the properties of various types of iron ore raw materials and metallurgical indicators of promising and current rational compositions of sintering and blast furnace charge were determined. Implemented technological methods and recommendations allowed to reduce the equivalent fuel consumption by 2-7 kg / t of pig iron.

It is shown that an increase in the low-temperature strength of the sinter, an increase in its recovery, a decrease in the volume of refractory masses in a blast furnace can potentially reduce the consumption of coke by 1.6-2.0 %.

Promising measures to improve converter smelting may be to use the construction of a three-tier lance, as well as improving the technology of blast and slag modes. Adjustable flow rates are used for primary (380-400 m³/min) and additional (20-40 m³/min) oxygen

A set of measures has been developed and implemented to ensure uniform consumption of pulverized coal around the circumference of blast furnaces. This allows you to stabilize the theoretical combustion temperature and to ensure a constant temperature on the tuyeres of blast furnaces. Specific consumption of coke is reduced by 2 %. Установлено, что с введением в шихту марганца увеличивается производство чугуна на 4 %, уменьшается расход кокса на 1,5 %, рациональным диапазоном содержания марганца в чугуне является 0,30-0,35 %.

A new direction of research for the industry has begun – the development of technology for the injection of pulverized coal into rotary lime kilns, which has reduced fuel consumption by 7 %.

It is shown that optimization of the chemical composition of steels and the use of rational heat treatment modes of railway wheels (using modernized vertical quenching machines) increase the reliability and durability of railway metal products. A significant economic effect is achieved.

For the production of high-quality metal products, metallographic studies of the critical temperatures of the beginning and end of phase transformations at various cooling rates of various steel grades are important. The developed recommendations for accelerated cooling modes allow us to identify areas of modernization of equipment for heat treatment of railway wheels of various chemical composition.

However, it should be noted that not all metallurgical enterprises in the industry pay enough attention to interaction with scientific organizations, including due to the lack of a programmatic approach to future development in the industry and sufficient funds for scientific research [7]. Such a policy leads to the loss of creative ties with traditional partners, and prevents both the authority of scientific organizations and their financial support. Under these conditions, the Institute is forced to seek a way out of this situation, including by attracting foreign partners. The scope of promising research on metallurgical topics can be significantly expanded with the availability of financing by metallurgical enterprises.

Conclusions

The analysis shows that scientific research in the iron and steel industry of the most industrialized countries is mainly aimed at improving existing and developing new technologies in all metallurgical processes, which reduce the consumption of material and energy resources, reduce costs and improve the quality of metal products.

It is shown that fundamental and applied research at the Iron and Steel Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine fully corresponds to the development trends of scientific research and the main trends in the development of world metallurgy. In a number of promising areas, the Institute's fundamental developments were carried out for the first time in world practice

The rapid pace of world scientific and technological progress shows the metallurgical enterprises the need for closer cooperation with scientific organizations. Scientific and technical potential of domestic science, including the Iron and Steel Institute of named after Z.I. Nekrasov NAS of Ukraine, and today is on the crest of world metallurgical science, which will allow production not only to meet global trends, but also to ensure the promising development of metallurgy,

References

1. Uzov O.V. & Sedykh A.M. (2015). Tendentsii razvitiya mirovogo rynka stali [Development trends of the global steel market]. *Byulleten' nauchno-tehnicheskoy i ekonomicheskoy informatsii. Chernaya metallurgiya* [Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economical Information], 2015, 9, 3-14 (in Russian).
2. Kanevskiy A.D. & Litvinenko V.G. (2014). Tendentsii energopotrebleniya v chernoy metallurgii Ukrainy [Energy consumption trends in the ferrous metallurgy of Ukraine]. *Ekologiya i promyshlennost'* [Ecology and industry]. 2014, 4, 74-77 (in Russian).
3. Retrieved from https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_the_iron_and_steel_industry_in_the_United_States (in Russian).
4. Kononov YU.V., Manshilin A.G. & Korenko M.G. (2015). Etapy razvitiya melkosortnykh, provolochnykh stanov i liteyno-prokatnykh agregatov dlya proizvodstva melkogo sorta i katanki [Development stages of small-section, wire mills and casting and rolling units for the production of small-section and wire rod]. *Metall i lit'ye Ukrainy* [Metal and casting of Ukraine], 2015, 7 (266), 9-20 (in Russian).
5. Babachenko A.I., Merkulov A.Ye. & Tubol'tsev L.G. (2019). Opyt i perspektivy razvitiya nauchnoy tematiki v Institute chernoy metallurgii [Experience and prospects for the development of scientific topics at the Institute of Ferrous Metallurgy]. *Metall i lit'ye Ukrainy* [Metal and casting of Ukraine], 2019, 7-8, 3-10 (in Russian).
6. Babachenko A.I. & Tubol'tsev L.G. (2019). 80 let na sluzhbe metallurgicheskoy nauke [80 years in the service of metallurgical science]. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tehnicheskoy i ekonomicheskoy informatsii* [Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economical Information], 2019, Vol. 78, 12, 1029-1036 (in Russian).
7. Tubol'tsev L.G. & Babachenko A.I. (2019). Programmnyy podkhod k razvitiyu chernoy metallurgii Ukrainy v sovremennykh usloviyakh [A programmatic approach to the development of ferrous metallurgy in Ukraine in modern conditions]. *Metall i lit'ye Ukrainy* [Metal and casting of Ukraine], 2019, 7-8, 11-17 (in Russian).

О.І.Бабаченко, д.т.н., с.н.с., директор, <https://orcid.org/0000-0003-4710-0343>
Л.Г.Тубольцев, к.т.н., с.н.с., зав.відділом, <https://orcid.org/0000-0001-9540-3037>
Інститут чорної металургії ім.З.І. Некрасова НАН України

Тенденції розвитку енергозберігаючих технологій в металургії

Анотація. Метою аналізу є виявлення тенденцій розвитку металургійного виробництва та використання енергозберігаючих металургійних технологій. Показано, що в світі триває стійка тенденція зростання виробництва сталі. Це свідчить про зростання споживання металопродукції в промисловості. Незважаючи на тенденцію скорочення обсягів виробництва сталі в Україні, увагу металургів до використання енергозберігаючих технологій не слабшає. Наведено тенденції і приклади використання в світовій практиці енергозберігаючих технологій у зіставленні з тенденціями вітчизняної металургії. Показано перспективні технології доменного, сталеплавильного і прокатного виробництв. Відзначено їх достоїнства і недоліки. Показано, що обсяги виробництва металургійної продукції тісно пов'язані з технічним рівнем виробництва і структурою виплавки стали. Відзначено, що тенденції розвитку вітчизняного металургійного виробництва в загальній основі збігаються з тенденціями розвитку світової металургії. Показано переваги та недоліки вітчизняного чорної металургії. Показані напрямлення наукових досліджень Інститута чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України (ІЧМ), которые соответствуют мировым тенденциям развития металлургии и охватывают весь круг проблем производства металлопродукции. Розробки мають комплексний характер, що є дуже важливою перевагою в сучасному світі. ІЧМ має серйозний науковий потенціал новітніх сучасних технологічних і технічних рішень для вітчизняного металургійного виробництва, що вже на стадії розробки адаптуються до існуючих технологічних і сировинних умов та їхніх змін. Більшість нових розробок за технологічним змістом і інтелектуальному рівню реалізації не поступаються світовим аналогам.

Ключові слова: металургійне виробництво, тенденції, технології, Інститут чорної металургії, дослідження, розробки

Посилання для цитування: *Бабаченко А.І., Тубольцев Л.Г.* Тенденции развития энергосберегающих технологий в металлургии. «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии». Сборник научных статей ИЧМ НАНУ. – 2019. - Вып.33. – С.33-42. (In English).

Аннотация

А.І.Бабаченко, д.т.н., с.н.с., директор, [ORCID 0000-0003-4710-0343](https://orcid.org/0000-0003-4710-0343)
Л.Г.Тубольцев, к.т.н., с.н.с., зав.отделом, [ORCID 0000-0001-9540-3037](https://orcid.org/0000-0001-9540-3037)

Інститут чорної металургії ім.З.І. Некрасова НАН України

Тенденции развития энергосберегающих технологий в металлургии

Целью анализа является выявление тенденций развития металлургического производства и использования энергосберегающих металлургических технологий. Показано, что в мире продолжается устойчивая тенденция роста производства стали. Это свидетельствует о возрастании потребления металлопродукции в промышленности. Несмотря на тенденцию сокращения объемов производства стали в Украине, внимание металлургов к использованию энергосберегающих технологий не ослабевает. Приведены тенденции и примеры использования в мировой практике энергосберегающих технологий в сопоставлении с

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2019. - Вып.33

«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33

ISSN 2522-9117 «Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii». – 2019. – Vypusk 33

тенденциями в отечественной металлургии. Показаны перспективные технологии доменного, сталеплавильного и прокатного производств. Отмечены их достоинства и недостатки. Показано, что объемы производства металлургической продукции тесно связаны с техническим уровнем производства и структурой выплавки стали. Отмечено, что тенденции развития отечественного металлургического производства в общей основе совпадают с тенденциями развития мировой металлургии. Показаны преимущества и недостатки отечественно черной металлургии. Показаны направления научных исследований Института черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины, которые соответствуют мировым тенденциям развития металлургии и охватывают весь круг проблем производства металлопродукции. Разработки имеют комплексный характер, что является очень важным преимуществом в современном мире. ИЧМ имеет серьезный научный потенциал новейших современных технологических и технических решений для отечественного металлургического производства, которые уже на стадии разработки адаптируются к существующим технологическим и сырьевым условиям и их изменениям. Большинство новых разработок по технологическому содержанию и интеллектуальному уровню реализации не уступают мировым аналогам.

Ключевые слова: металлургическое производство, тенденции, технологии, Институт черной металлургии, исследования, разработки

Ссылка для цитирования: *Бабаченко А.И., Тубольцев Л.Г.* Тенденции развития энергосберегающих технологий в металлургии. //«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2019. - Вип.33. – С.33-42. (In English). DOI 10.52150/2522-9117-2019-33-33-42

*Статья поступила в редакцию сборника 5.12.2019 года,
прошла внутреннее и внешнее рецензирование (Протокол заседания
редакционной коллегии сборника №20т 23 декабря 2019 года)*

А.С.Нестеров, к.т.н., с.н.с., зав. отделом; ORCID 0000-0002-0183-0327

Л.И.Гармаш, к.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0002-9540-3037

Институт черной металлургии им.З.И.Некрасова НАН Украины

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ ЗА СЧЕТ УЛУЧШЕНИЯ КАЧЕСТВА ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Аннотация. В работе отмечено, что при освоении технологии вдувания пылеугольного топлива (ПУТ) на металлургических предприятиях Украины необходимо интенсифицировать работы, в том числе, и научно-исследовательские, в направлении повышения качественных характеристик агломерата, стабильности его химического состава и прочностных параметров. Проведен анализ качества железорудного сырья, применяемого в аглодоменном производстве Украины и зарубежных стран. Приведены требования международных и отечественных стандартов к качеству сырья и топлива, обеспечивающие вдувание в горн больших количеств ПУТ. Описана методика определения качества сырья, разработанная в ИЧМ. Приведены результаты исследования по этой методике качества железорудного сырья. На основании анализа результатов проведенных исследований для топливно-сырьевых условий предприятия были разработаны требования к качеству гранулированных железорудных отходов и их рациональному количеству в составе агломерационной шихты, а также отработан процесс производства гранул. Разработаны рекомендации по использованию в агломерационной шихте части гранулированных компонентов вторичных отходов, что позволило повысить содержание вторичных ресурсов в шихте. В результате стабилизирован химический состав агломерата, улучшена его прочность, сокращен выход агломерата второго сорта, уменьшен вынос колошниковой пыли и расход кокса. Повышение качества агломерата и рациональное распределение шихтовых материалов по сечению колошника доменной печи позволяет обеспечить самообновление защитного гарнисажа, сократить вынос колошниковой пыли на 4,3 кг/т чугуна, уменьшить расход кокса на 19,6 кг/т чугуна. Разработанные мероприятия позволяют повысить конкурентоспособности продукции, даже при дополнительных затратах на подготовку агломерационной шихты к спеканию.

Ключевые слова: доменная печь, качество железорудного сырья, методика исследования, агломерат, вторичное железорудное сырье, гранулирование, спекание

Ссылка для цитирования: *Нестеров А.С., Гармаш Л.И.* Повышение эффективности доменной плавки за счет улучшения качества железорудных материалов. //«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2019. - Вып.33. – С.43-60. (In Russian). DOI 10.52150/2522-9117-2019-33-43-60

Состояние вопроса. Интенсификация доменного процесса предъявляет все более жесткие требования к свойствам железорудного сырья (ЖРС) и топлива. Ведущие мировые металлургические предприятия в свое время пошли по пути повышения качества сырья и в

настоящее время используют в доменной плавке агломерат, окатыши и кокс высокого качества, что позволяет поддерживать стабильность технологического режима плавки и достигать лучших технико-экономических показателей работы доменных печей. Это стало мощным фундаментом совершенствования технологии и позволило без значительных осложнений перейти к технологии вдувания пылеугольного топлива (ПУТ) со значительным сокращением расхода кокса.

Для компенсации значительного снижения доли кокса в шихте и обеспечения полного сгорания ПУТ в фурменных зонах необходимо реализовать несколько довольно дорогостоящих мероприятий [1]:

- повысить температуру дутья до 1100-1300°C и увеличить содержание в нём кислорода до 25-33%;
- увеличить прочность железорудной шихты и уменьшить содержание в ней мелочи до 1-5%;
- повысить горячую прочность кокса до 60-70%;
- обогатить железорудную шихту и снизить основность шлака до 1-1,15 ед. с целью оптимизации его свойств и снижения выхода до 200-300 кг/т чугуна;
- ограничить приход серы и щелочей с шихтой.

На VIII Международном доменном конгрессе (2016 г.) отмечалось, что при освоении технологии вдувания ПУТ на предприятиях Украины и России необходимо интенсифицировать работы, в том числе, и научно-исследовательские, в направлениях [2]:

- повышения качественных характеристик агломерата по стабильности химического состава и прочностным параметрам;
- повышения качественных характеристик кокса по прочностным параметрам;
- подбора углей для приготовления и вдувания пылеугольного топлива в доменные печи.

Аналогичные выводы были сделаны и на ежегодном совещании доменщиков Украины в 2017 г. При реализации технологии вдувания ПУТ на отечественных предприятиях особо следует учесть два важных фактора [3]:

- необходимость доведения качества украинских железорудных материалов, в первую очередь, окатышей до лучших мировых показателей по содержанию железа и прочности;
- отрицательное влияние окатышей на стойкость футеровки и системы охлаждения, приводящее к сокращению длительности кампании доменных печей.

Улучшения качества ЖРС невозможно достичь без повышения степени его обогащения и кардинального обновления агломерационного производства. Все украинские аглофабрики построены еще в 50-х годах

прошлого столетия, на сегодня их моральный и физический износ достигает 100%. Высокое содержание мелочи в железорудном сырье приводит к снижению эффективности работы доменной печи. Вследствие нестабильности сырья по богатству железом, основности и горячей прочности возрастает количество перешихтовок, усиливается колеблемость теплового и шлакового режимов, что в дальнейшем вызывает потерю производительности и перерасход кокса [4]. Известно, что:

- повышение содержания Fe в шихте на 1% приводит к уменьшению расхода кокса на 1,5-2,5%;
- снижение колебаний содержания Fe в агломерате на 0,5-1% обеспечивает снижение удельного расхода кокса на 7-10 кг/т чугуна;
- повышение эффективности грохочения материалов на 1% позволяет снижать расход топлива в доменном процессе на 0,8-1%;
- каждый выведенный из железорудной шихты 1% фракции 0-5 мм может привести к увеличению производительности печи на 1% при снижении расхода кокса на 0,5 %.

В табл. 1 показана динамика изменений в последние годы показателей качества агломерата (в среднем по предприятиям «Укрметаллургпром»). Самые большие колебания наблюдаются по основности (около 5% отн.), колебания значений количества фракции 0-5 мм постепенно снижаются, по Fe за эти годы – среднее содержание около 54,3%, разброс около 1% отн.

Таблица 1 – Показатели качества агломерата (ср. на предприятиях «Укрметаллургпром»).

	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Feобщ, %	53,63	53,98	54,86	54,91	55,06	54,04	53,83	54,0	54,09
Фр.0-5 мм	15,58	15,48	13,26	13,21	12,96	12,81	12,81	12,61	11,75
CaO/SiO ₂	1,303	1,342	1,276	1,267	1,244	1,351	1,414	1,418	1,407

Для условий украинских предприятий одной из основных причин недостаточной эффективности технологии ПУТ является качество сырья и кокса [5]. Для сравнения в таблице 2 приведены показатели качества агломерата и окатышей на украинских и зарубежных предприятиях.

Сравнение характеристик украинского и зарубежного ЖРС показывает, что только за счет повышения его качества украинские производители при выплавке чугуна могут добиться сокращения ~10% условного топлива.

Технология вдувания ПУТ кардинально повышает требования к коксу, поскольку его низкое качество не обеспечивает требуемой газопроницаемости столба доменной шихты, особенно в зоне высоких температур. Гетерогенные включения повышают вязкость и плавкость промежуточных и конечных доменных шлаков, в результате чего

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2019. - Вип.33

«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33

ISSN 2522-9117 *«Fundamental'nye i prikladnye problemy černoј metallurgii». – 2019. – Vypusk 33*

нарушается ровность хода печи, затрудняется переход серы из металла в шлак, ухудшается дренажная способность продуктов плавки в горне доменной печи [6-7].

Таблица 2 – Показатели качества агломерата и окатышей на украинских и зарубежных предприятиях.

Параметры	Обозначения	Агломерат		Окатыши	
		Украина	Ведущие мет. компании	Украина	Ведущие мет. компании
Химический состав, %	Fe	54,09	60,68	62,57	66,7
	FeO	14,8	12,11	2,0	1,5
	SiO ₂	9,2	4,72	6,55	3,2
	CaO	11,44	6,54	2,49	1,12
	MgO	1,5	2,2	0,9	0,22
	TiO ₂	-	0,5	-	0,05
	CaO/SiO ₂	1,24	1,39	0,35	0,35
Свойства					
Барабан, %	Б +5	66,8	82,42	91,2	94,9
	Б -0,5	6,4	1,5	5,8	3,6
ИСО 4700	прочность, кг/ок	-	-	220	238
ИСО 4695	dR/dt		1,2		0,9
ИСО 46961, %	RDI +6,3	39,6	52,5	-	91,7
	RDI - 3,15	-	19,05	-	4,8
	RDI - 0,5	12,2	5,0	8,8	4,8
ИСО 7215, %	Rf	52,88	54,84	47,8	45,6
ИСО 7992	dH 80	н.д.	0,86	н.д.	н.д.
	dR/dt	н.д.	1,23	н.д.	0,9
	t, мин.	н.д.	70,05	н.д.	н.д.
ИСО 13930, %	LTD + 6,3	24,8	33,93	56,4	76,1
	LTD - 3,15	н.д.	32,78	н.д.	16,1
	LTD - 0,5	24,6	12,03	18,2	10,4
Расчетные высокотемпературные свойства					
Обобщенный показатель качества ПК	L - 0,5, %	14,6	8,0	8,0	5,82
	Wk/Wl, ед.	2,2	2,1	1,9	2,18
	Tnf, °C	1340	1472,7	1320	1365
	M ost., %	7	28	9	7,8
	FeO п.ш., %	18	5,2	42,1	35,75
	M п.ш., %	22	4,0	32,9	26,8
	Пк., балл	11,23	22,7	13,8	23,2

Современные требования к качеству сырья и кокса при вдувании ПУТ представлены в табл. 3-4. Металлургические свойства железорудных материалов и кокса, используемых в аглодоменном производстве, определяются международными (ISO) и отечественными (ГОСТ/ДСТУ) стандартами качества. Оценку качества сырья обычно осуществляют по химическому составу, содержанию фракции -5,0 мм и холодной прочности по ГОСТ15137-77 [8]. Эти показатели существенно влияют на газодинамические свойства столба шихтовых материалов в рабочем объеме доменной печи, однако не в полной мере отражают особенности физико-химических процессов.

Таблица 3 – Показатели качества агломерата, обеспечивающие требуемый уровень вдувание в горн больших количеств ПУТ.

Показатели качества агломерата	Уровень
Допустимое отклонение содержания железа от среднего, %	±0,5
Допустимое отклонение от среднего по основности, ед.	±0,05
Допустимое отклонение от среднего содержания FeO, %	±1,0
Содержание фракции –5 мм в скиповом агломерате	≤5,0
Выход фракции +5 мм при испытаниях на прочность по ГОСТ 15137-77, %	≥80,0
Выход фракции +5 мм после восстановления по ГОСТ 19575-84, %	≥50,0
Выход фракции –0.5 мм при испытаниях на истираемость по ГОСТ 15137-77, %	≤4,0
Выход фракции –0.5 мм после восстановления по ГОСТ 19575-84, %	≤5,0
Перепад давления газа в слое при восстановлении по ГОСТ 21707-76, Па (мм.вод.ст)	≤147 (15)

Таблица 4 – Показатели качества кокса, обеспечивающие вдувание в горн больших количеств ПУТ.

Показатели качества кокса	Требуемый уровень
Показатель прочности M_{25} , %	≥87,0
Показатель прочности M_{10} , %	≤6,0
Показатель прочности M_{40} , %	≥87,0
Показатель истираемости M_{10} , %	≤5,5
Содержание фракции +80 мм, %	≤5,0
Содержание фракции –40 мм, %	≤10,0
Влажность, %	≤0,5
Прочность после обработки CO ₂ (стандарт ISO) CSR, %	≥60,0
Реакционная способность по ГОСТ 10089-89, ед.	18-20
Реакционная способность по ISO CSI, %	23-28
Зольность, %	9-10

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2019. - Вип.33

«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33

ISSN 2522-9117 «Fundamental'nye i prikladnye problemy černoј metallurgii». – 2019. – Vypusk 33

Наиболее полно качество рудной части доменной шихты определяется в соответствии с ОСТ 14-9-96-83 «Система показателей качества продукции. Руды железные и марганцевые. Номенклатура показателей» (табл. 5).

Таблица 5 - Система показателей качества продукции. Руды железные и марганцевые.

Наименование показателя качества и единица измерения	Применяемость показателя качества		
	Вид продукции		
	руда	агломерат	окатыши
1. Химический состав			
1.1. Содержание железа, %	+	+	+
1.2. Допустимое отклонение по содержанию железа, %	+	+	+
1.3. Содержание двуокиси кремния, %	X	X	X
1.4. Содержание нерастворимого остатка, %	X	X	X
1.5. Основность	-	+	-
1.6. Допустимое отклонение по основности	-	+	+
1.7. Содержание фосфора, %.	X	X	X
1.8. Содержание серы, %.	X	X	X
1.9. Содержание окиси магния, %.	X	X	X
1.10. Содержание окиси кальция, %.	X	X	X
1.11. Содержание окиси алюминия, %.	X	X	X
1.12. Содержание закиси марганца, %.	X	X	X
1.13. Содержание пятиокиси ванадия,	X	X	X
1.14. Содержание меди, %.	X	X	X
1.15. Содержание цинка, %.	X	X	X
1.16. Содержание закиси железа, %	X	X	X
2. Гранулометрический состав			
2.1. Содержание контрольного класса крупности.	+	+	+
3. Показатели физических свойств			
3.1. Содержание влаги, %.	+	-	-
3.2. Допустимое отклонение по содержанию влаги, %.	-	-	-
3.3. Удельная поверхность, см ² / г.	-	-	-
3.4. Истинная плотность, г/ см ³	X	X	X
3.5. Объемная плотность, г/ см ³	X	X	X
3.6. Насыпная плотность, кг/ см ³	X	X	X
3.7. Газопроницаемость, Па	X	X	X
3.8. Усадка слоя при восстановлении, %	X	X	X
3.9. Температура начала размягчения, °C	X	X	X

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2019. - Вип.33

«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33

ISSN 2522-9117 «Fundamental'nye i prikladnye problemy černoј metallurgii». – 2019. – Vypusk 33

4. Показатели физико-химических свойств			
4.1. Потери при прокаливании, %	X	X	X
4.2. Прочность при восстановлении, %	X	X	X
4.3 .Восстановимость	X	X	X
4.4. Степень восстановления, %	X	X	X
4.5.Набухание при восстановлении, %	-	X	X
5. Показатели физико-механических свойств			
5.1. Прочность на сжатие, кг/окатыш	-	-	+
5.2 Показатель прочности, %	-	+	+

«+» обозначает обязательное применение показателя качества;

«-» обозначает, что показатель не применяется;

«X» обозначает, что показатель является справочным.

Как видно из таблицы, как в советских ГОСТах, так в дальнейшем и в украинских, обязательными параметрами являются только содержание железа и основность и допустимые отклонения по ним, прочность в исходном состоянии и гранулометрический состав. Характеристики же металлургических свойств редко используется, хотя, как показано отечественными и зарубежными исследователями, такие металлургические свойства железорудных материалов как низкотемпературная прочность, восстановимость, плавкость значительно влияют на производительность доменных печей и расход условного топлива. Так, например, рост на 10% низкотемпературной прочности повышает расход дутья на 1,7-2% и степень использования газа на 2%, а изменение восстановимости на 1% приводит к изменению расхода кокса на 0,3-0,8%.

Взаимосвязь высокотемпературных характеристик железорудного сырья с показателями доменной плавки изучена не достаточно, как правило, используются регрессионные уравнения (табл. 6).

Таблица 6 – Влияние металлургических свойств железорудных материалов на расход кокса.

Вид испытаний	Показатели	Влияние изменения параметра на расход кокса
Химический состав	Fe	1% → 0,9-1,5%K
	CaO/SiO ₂	0,1ед. → 0,5-1% K
ГОСТ 15137-77	Выход фракции -5мм	1% → 0,05 K
	Выход фракции -0,5мм	1% → 0,2 K
ГОСТ 19575-84	Истираемость X 0-0,5мм	1% → 0,2% K
Восстановимость	Степень восстановления R _к	1% → 0,3-0,5% K
Высокотемпературные испытания	T нач. фильтрации	50°C → 1%K
	Содержание FeO в первичном шлаке	10% → 0,5%K

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2019. - Вип.33

«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33

ISSN 2522-9117 «Fundamental'nye i prikladnye problemy černoј metallurgii». – 2019. – Vypusk 33

Методики определения параметров качества железорудного сырья и параметры испытаний регламентируются международными и отечественными стандартами (табл. 7 и рис. 1).

Таблица 7 – Стандартные методики определения металлургических свойств железорудного сырья.

Характеристика	Международный стандарт	Аналогичный украинский стандарт
Холодная прочность, истираемость	ИСО 3271 Вращение в цилиндрическом барабане диаметром 1000 мм длиной 500 мм. Количество оборотов 200. Масса пробы 15 кг фракция 10-40 мм. Прочность: выход фр. + 6,3 мм Истираемость: выход фр. - 0,5мм	ГОСТ 15137-77 То же + 5 мм (+6,3) - 0,5 мм
Прочность окатышей при сжатии	ИСО 4700 Диаметр испытуемых окатышей, мм 10-12,5	ГОСТ 24765-81 10-15 (12,5)
Восстановимость	ИСО 4695 Восстановительный газ - CO, N ₂ Температура восстановления - 950°C	ГОСТ 28657-90 Проба массой 500 г, Крупность 10-12,5 мм. Состав вост. Газа CO (33±0,5), N ₂ - (65±0,5); Расход газа 30 дм ³ /мин. Скорость нагрева: До 600°C -15°C/мин. От 600 до 1100 - 2,86°C/м.
Относительная восстановимость	ИСО 7215 Восстановительный газ - CO, N ₂ Температура восстановления - 900°C. Проба фракции 10-12,5 мм	ГОСТ 28658-90 То же Проба фракции 1-3 мм
Прочность после восстановления	ИСО 4696-1 ИСО 4669-2 Изотермическое восстановление в неподвижном слое в течение 30 мин. при 550°C . Расход восстановительного газа (15±1) дм ³ /мин. Состав, %: CO (30±0,5); N ₂ - (70±0,5), Показатель RDI - выход фракции -2,8 мм после 900 оборотов барабана со скоростью 30 об/мин масса пробы 500 г, крупность: агломерата и руды -16-20 мм; окатышей - 10 - 12,5 мм	Отсутствует
Набухание окатышей	ИСО 4698	ГОСТ 26135-84

Восстановление под нагрузкой	ИСО 7992 Изотермическое восстановление при 1050° под нагрузкой (50±2) кПа при расходе газа 83 дм ³ /мин. Состав, %: -СО (40±0,5), N ₂ -(58±0,5), Н ₂ -(2,0±0,5) Продолжительность -до достижения потери кислорода 80%, Масса пробы 1200 г, фракция 10-12,5 мм. Показатели: перепад давления в слое, его усадка.	ГОСТ 21707-76 Давление на пробу 100 кПа. Нагрев до 600°С со скоростью 15°/мин., от 600 до 1050°С- 2,81°С/мин. Расход восстановительного газа 50 дм ³ /мин. Состав, % : СО (33±0,5), N ₂ - (65±0,5); Показатели: перепад давления в слое, его усадка, степень восстановления.
Растрескивание руды	ИСО 8381 Метод оценивает эффект воздействия быстрого нагрева от комнатной температуры до 700° С за 30 мин на отобранную по размеру навеску 20-25 мм. Показатель: выход фракции менее 6,3 мм.	Отсутствует
Прочность при восстановлении	ИСО 13930 Восстановление при постоянной температуре 500°С в течение 60 минут. Расход восстановительн. газа (20±1) дм ³ /мин, состав СО (20±0,5); СО ₂ (20±0,5); N ₂ -(58±0,5), Н ₂ -(2,0±0,5) Масса пробы 500 г Крупность 10-12,5 мм Показатели: Коэффициенты прочности – фр. + 6,3 мм, измельчения – фр. -3,15 мм, истираемости - фр. - 0,5 мм	ГОСТ 19575-84 Масса, крупность пробы, состав газа как при определении восстановимости. Расход восстановительного газа -дм ³ /мин. Скорость нагрева: до 600°С 15°С/ мин. От 600 до 800°С- 1,43°С/мин. Показатели: прочность- фр. +10, разрушаемость -фр. 0,5-5 мм, истираемость - фр. 0 - 0,5 мм

На зарубежных предприятиях качество шихтовых материалов испытывается соответствующим стандартам ИСО с определенной периодичностью:

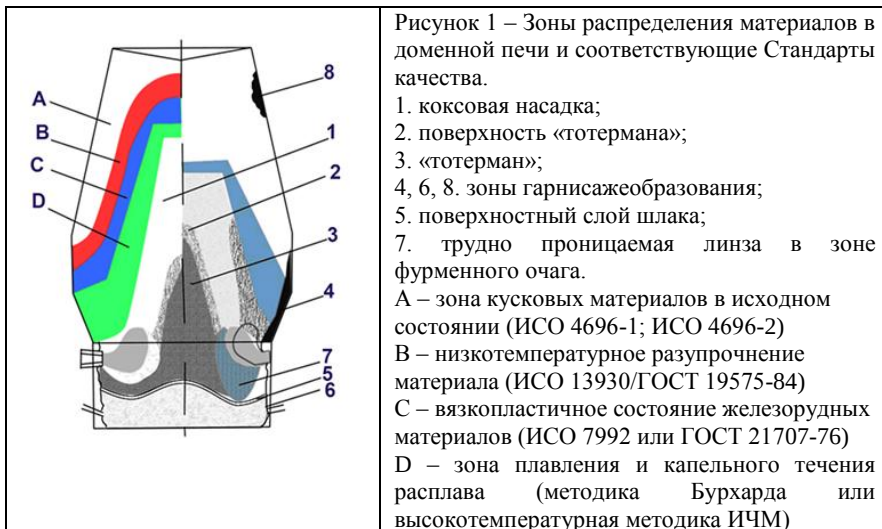
- химический состав - каждые 2 часа;
- холодная прочность - 4 часа;
- пористость - 4 часа;
- ситовая характеристика - 8 часов;

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2019. - Вип.33

«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33

ISSN 2522-9117 «Fundamental'nye i prikladnye problemy černoј metallurgii». – 2019. – Vypusk 33

- восстановимость - 8 часов;
- восстановление под нагрузкой - 24 часа;
- размягчение под нагрузкой - 24 часа;
- разбухание окатышей - 24 часа.



На украинских предприятиях требования большинства ГОСТов редко используются в полной мере. Практика показывает, что при наличии на металлургическом предприятии собственной аглофабрики либо при постоянном поставщике сырья часто ограничиваются минимальными сведениями о его качестве и лишь в особых случаях проводят проверочные испытания. Как правило, оценка качества ЖРС ограничивается определением его химсостава и прочности по ГОСТу 15137-77 (ИСО 3271), хотя зачастую этих параметров не достаточно.

Для сопоставительного анализа различных видов железорудного сырья и оценки их влияния на производительность доменных печей и удельный расход топлива в ИЧМ в соответствии с перечисленными ГОСТами разработаны требования к металлургическим свойствам агломерата и окатышей (табл.8).

Изложение основных материалов исследования. В настоящее время в шихте доменных печей используется одновременно несколько видов сырья (агломерат, окатыши, руда, железосодержащие и флюсующие добавки, различные виды вторичных и пр.), физико-химические свойства которых существенно различаются.

Таблица 8 – Требования к качеству железорудного сырья.

Вид испытаний	Показатели качества	Величины показателей	
		агломерат	окатыши
ГОСТ 24765-81	Содержание в отгружаемой продукции (%) материала, с сопротивлением сжатию кг/образец (КН)	– –	Не менее 90 220 (3,0)
ГОСТ 15137-77	Прочность на удар (выход класса +5 мм), в стандартном барабане, %	Не менее 80	Не менее 95
	Истираемость (выход фр. 0,5 – 0 мм), %	Не более 4	Не более 3
	Крупность (мм) отгружаемой продукции, %	8-35 не менее 85	8-12 (8-16) не менее 95
	Содержание мелочи (выход фр. 5,0 – 0-мм) в отгружаемой, продукции, %	Не более 10	Не более 3
ГОСТ 21707-76	Прочность, выход фракции +5 мм после восстановления, (X_{+10})	Не менее 50	Не менее 80 (70)
	Истираемость, выход класса $X_{-(0,5-0\text{ мм})}$ при восстановлении, %	Не более 5	Не более 5
	Перепад давления газового потока при восстановлении слоя под нагрузкой, % мм вод. ст. (Па).	Не более 15 (147)	Не более 20 (196)
Допустимые колебания химического состава	содержания железа, %	Не более ±0,25	Не более ±0,25
	закиси железа, %	±1,0	–
	основности (CaO/SiO_2)	±0,025	±0,025
Допустимое содержание щелочей, %		Не более 0,15	Не более 0,15
Высокотемпературные испытания	Температура потери газопроницаемости слоя, °С	1260-1280	1230-1250
	Температура начала фильтрации жидких фаз, °С	Не менее 1380	Не менее 1350/1380*
	Температура максимальной, фильтрации расплава, °С	1500-1540	1500
	Содержание FeO в первичном шлаке, %	Не более 12	Не более 30/60
	Масса остатка расплава в слое кокса при температуре 1600°С, %	Не более 18	Не более 8

* для неокисляемых окатышей с содержанием SiO_2 менее 5%.

Для моделирования их поведения в процессе от загрузки в доменную печь до образования металла и шлака в ИЧМ разработана и используется на практике методика, включающая последовательные испытания металлургических свойств материалов различного химического состава и способа окускования в диапазоне температур 20-1600°С, в том числе,

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2019. – Вип.33

«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33

ISSN 2522-9117 «Fundamental'nye i prikladnye problemy černoј metallurgii». – 2019. – Vypusk 33

оценку холодной и горячей прочности, относительной восстановимости, а также оценку поведения материала в зоне размягчения, плавления и капельного течения [9].

Методика использует расчетные и экспериментальные методы и включает несколько этапов:

- лабораторные спекания аглошихты;
- контроль металлургических свойств;
- расчет комплексного показателя качества (Пк) по методике определения металлургической ценности железорудного сырья [10];
- проплавку лабораторных агломератов на коксовой насадке различной степени замусоренности;
- определение высокотемпературных свойств;
- анализ поведения различных смесей ЖРС при восстановительно-тепловой обработке.

Результаты экспериментов позволяют разрабатывать рекомендации по эффективному использованию различных видов ЖРС в доменной плавке на основе комплексного анализа их металлургических свойств и поведения в высокотемпературной зоне. На основе проведенных в ИЧМ исследований была опробована и внедрена в условиях одного из украинских предприятий технология подготовки части металлургических отходов к аглодоменному переделу, позволившая при сохранении качества чугуна уменьшить расход минерального сырья за счет увеличения расхода вторичных ресурсов. Содержание вторичных ресурсов в агломерационной и доменной шихте, используемой на предприятии, составляло 22-25 % от массы всех железосодержащих и флюсовых материалов. Ситуация осложнялась тем, что доля частично офлюсованных окатышей в составе шихтовых материалов периодически изменялась от 20 до 55 %, вызывая необходимость изменения химического состава агломерата в достаточно широком диапазоне. Что, в свою очередь, приводило к необходимости изменений программ распределения шихтовых материалов по сечению колошника так, чтобы обеспечивалась сохранность футеровки доменных печей.

Для выработки рекомендаций по предотвращению негативных явлений, связанных с резкими изменениями состава и свойств сырья, в лабораторных условиях ИЧМ были проведены исследования, включающие спекания аглошихты переменной основности с различными вторичными ресурсами, часть из которых были дополнительно гранулирована. Удельные расходы компонентов аглошихты задавали так, чтобы суммарный расход концентрата, руды, конвертерного шлака, известняка и вторичных ресурсов на 1 т агломерата оставался постоянным. Часть вторичных ресурсов (доменный отсев окатышей в смеси со шламами) брикетировалась в виде гранул. Расход

гранулированных отходов увеличивали за счет сокращения количества шлама. Состав аглошихты приведен в табл. 9, результаты спеканий в табл. 10, состав агломерата и его свойства в табл. 11 и 12.

Таблица 9 – Химический состав компонентов аглошихты.

Материал	Fe	FeO	SiO ₂	CaO	Mn	MgO	Al ₂ O ₃	P	C	S	Zn
Гран.отходы промышл.	51,60	20,70	8,00	7,60	0,32	1,77	0,73	0,02	0,08	0,02	0,00
Гран. отходы лаборат. углеродсод.	40,30	18,00	8,60	7,20	0,32	1,75	0,73	0,02	28,40	0,00	0,00
Аглоруда	60,09	4,28	5,11	0,16	0,00	0,39	2,18	0,05	0,38	0,03	0,00
Концентрат ИнГОК	67,00	30,14	6,11	0,15	0,02	0,48	1,48	0,03	0,18	0,03	0,00
Конвертерный шлак	15,07	15,60	20,45	52,29	2,36	8,51	2,38	0,23	0,00	0,43	0,00
Шлам	49,00	13,21	5,81	8,50	0,32	1,77	1,84	0,04	7,05	0,57	0,18
Окалина	70,98	55,40	0,62	0,88	0,42	0,81	1,19	0,03	0,44	0,04	0,05
Аспирационная пыль	55,81	8,85	6,52	6,94	0,06	1,06	1,63	0,05	3,56	0,27	0,00
Колошниковая пыль	37,22	8,94	7,73	10,85	0,14	1,71	1,95	0,03	14,42	0,67	0,31
Отходы с прессножниц	57,62	9,23	7,48	6,79	2,56	4,60	1,79	0,00	0,00	0,00	0,00
Мет.фракция 0- 10 мм	48,00	10,41	11,17	26,30	2,56	4,60	1,79	0,00	0,00	0,00	0,00
Промсырье	38,10	8,87	8,20	10,19	0,00	1,65	1,90	0,03	8,56	0,27	0,00
Окалина ММЗ	72,54	55,08	0,69	0,68	0,49	0,52	1,08	0,03	0,52	0,05	0,05
Известняк Комсомольс.РУ	0,10	0,00	3,84	51,55	0,60	1,61	0,34	0,00	11,84	0,06	0,00
Известь	0,20	0,00	2,06	66,00	0,00	10,96	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Таблица 10 – Результаты спеканий.

Показатели	Гранулы				
	промыш- ленные	лабораторные углеродсодержащие			
Расход коксовой мелочи, кг/т	43	43	37	31	25
Насыпная масса шихты, т/м ³	1,85	1,83	1,80	1,81	1,8
Выход годного, %	74,5	65,55	76,78	73,85	60,34
Вертикальная скорость спекания, мм/мин.	23,29	20,08	23,13	20,89	21,81
Удельная производительность, т/м ² час	1,74	1,35	1,80	1,55	1,33
Испытания на барабане + 5 мм, %	65,6	69,7	69,2	65,08	66,0

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2019. - Вип.33

«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33

ISSN 2522-9117 «Fundamental'nye i prikladnye problemy černoј metallurgii». – 2019. – Vypusk 33

Таблица 11 – Химический состав и металлургические свойства агломерата при использовании в шихте различных гранул

	Расход коксовой мелочи	Fe	CaO/SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	FeO
Пром. гран.	43	55,37	1,67	2,00	1,85	10,70
Лабор.гран.	43	54,72	1,66	1,98	1,86	16,50
Лабор.гран.	37	54,85	1,67	1,98	1,84	13,90
Лабор.гран.	31	54,85	1,68	2,00	1,81	12,10
Лабор.гран.	25	54,83	1,68	1,98	1,79	8,70

Таблица 12 – Химический состав и металлургические свойства агломерата при использовании в шихте различных гранул

	Расход кокс. мелочи	Б+5	Б-0,5	Б+6,3	Б-0,5	T _{нф}	M _{ост}	FeO _{пш}
Пром. гран.	43	65,60	5,30	34,59	5,78	1370	13,44	10,13
Лабор. гран.	43	69,70	5,30	-	-	-	-	-
Лабор. гран.	37	69,20	5,10	36,80	5,60	1380	12,50	7,90
Лабор. гран.	31	65,08	7,20	-	-	-	-	-
Лабор. гран.	25	66,00	7,80	-	-	-	-	-

Анализ результатов исследования свойств промышленных и лабораторных агломератов показал, что использование в составе агломерационной шихты части гранулированных отходов (60-85 кг на тонну агломерата) в сравнении с агломератом, спеченным с неподготовленными отходами, привело к:

- повышению прочности агломерата в исходном состоянии на 3,5-4%;
- сохранению его истираемости на удовлетворительном уровне (6,3% и 6,2% соответственно);
- повышению низкотемпературной прочности (по выходу фракции +6,3%) на 2,5-3,5%;
- улучшению восстановимости на 0,5-1,0%.

Значения температур размягчения, плавления и капельного течения расплава практически не изменились (находились в пределах статистического отклонения), а содержание FeO в первичных шлаковых расплавах, полученных при проплавке лабораторных агломератов, уменьшилось на 1,5-3%.

Вывод. Анализ технико-экономических показателей работы агломерационного цеха с использованием гранулированных отходов подтвердил эффективность гранулирования, при этом:

- вертикальная скорость спекания аглошихты при вводе отсева окатышей в количестве до 85 кг/т агломерата осталась на базовом уровне;
- прочность агломерата при содержании отсева окатышей более 85 кг/т и недоокомковании шихты резко упала;
- замена отсева окатышей гранулами из отсева окатышей и шлама привела к увеличению скорости спекания на 7,6 % (с 21,63 до 23,26 мм/мин), прочность агломерата при этом увеличилась на 3,8 %;
- выход агломерата второго сорта сократился на 2,3 %, основность агломерата в среднем повысилась с 1,5 до 1,85 ед.;
- прочность агломерата ($B > 5$) повысилась на 2,4 %;
- соотношение концентрат/агломерата уменьшилось с 1,36 до 1,24;
- количество вторичных ресурсов увеличилось на 26,4 кг/т агломерата;
- постоянство состава агломерата по основности улучшилось на 7,5%.

Разработаны требования к качеству гранулированных отходов и их рациональному количеству в составе агломерационной шихты, а также отработан процесс производства гранул, которые позволили увеличить количество вторичных ресурсов в составе аглошихты, стабилизировать химический состав агломерата, улучшить его прочность и сократить выход агломерата второго сорта.

Повышение качества агломерата и рациональное распределение шихтовых материалов по сечению колошника, обеспечивающие самообновление защитного гарнисажа, позволили сократить вынос колошниковой пыли на 4,3 кг/т чугуна и уменьшить расход кокса на 19,6 кг/т чугуна, что привело к улучшению конкурентоспособности продукции даже при дополнительных затратах на подготовку аглошихты к спеканию.

Перелік посилань

1. *Peters M., Korthas B., Schmole P.* The past, present and future of pulverized coal injection at ThyssenKrupp Steel AG Proc. 36th Mc-Master University Symp. on Iron and Steelmaking, Hamilton, Ontario, Canada, 23 - 25 September 2008, p. 14-29.
2. *Третьяк А.А.* Рекомендации VIII Международного конгресса «Металлургия чугуна – вызовы XXI века// *Металлургия чугуна – вызовы XXI века. Труды VIII Международного конгресса доменщиков.* – М: Изд.дом «Кодекс». – 2017. – С. 609-612.
3. *Материалы 26-й Конференции Доменщиков Украины (11-12 октября 2017 г., ЧАО "ММК им. Ильича)/* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://fex.net>
4. *Волков Ю.П., Шнарбер Л.Я., Гусаров А.К.* Технолог-доменщик. М.: *Металлургия.* – 1986. – 263 с.
5. *Зражевский А.Д.* Доменное производство Украины // *Труды VIII Международного конгресса доменщиков “Металлургия чугуна – вызовы XXI века”.* – М.: Кодекс. – 2017. – С. 35-37.

6. *Процессы при вдувании угольных пылей в доменную печь*/ Летцель Д., Хунгер Й., Крюгер В. и др. // Черные металлы. – 1999. – №5. – С.20-28.
7. *Гладков Н.А., Нестеров А.С.* Процессы в слое железорудных материалов при его нагревании / Металлы. – 1987 №3 С.9-11.
8. *Золотухин Ю. А.* Требования к качеству кокса для доменных печей, работающих с различным удельным расходом пылеугольного топлива / Золотухин Ю. А., Андрейчиков Н. С., Куколев Я. Б. // Кокс и химия. – 2009. – № 3. – С. 25-31.
9. *ГОСТ 15137-87.* Руды железные и марганцевые, агломераты и окатыши. Метод определения прочности во вращающемся барабане. – М.: Издательство стандартов, 1987. – 6 с.
10. *Исследование* высокотемпературных свойств железорудных материалов в лабораторных условиях. Нестеров А.С., Гармаш Л.И., Лопатенко К.П. и др. // Сб. научн. тр. ИЧМ «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии». – Днепропетровск. – 2018. – Вып.32. – С.64-79.
11. *Патент* РФ №2283877 Способ определения металлургической ценности доменного железорудного сырья / Гуркин М.А., Гельгорн А.В., Нестеров А.С., Большаков В.И., Невраев В.П., Денисова С.Ю., Якушев В.С.

Reference

1. *Peters M., Korthas B., Schmole P.* The past, present and future of pulverized coal injection at ThyssenKrupp Steei AG Proc. 36th Mc-Master University Symp. on Iron and Steelmaking, Hamilton, Ontario, Canada, 23 - 25 September 2008, p. 14-29.
2. *Tretyak A.A.* (2017). Rekomendatsii VIII Mezhdunarodnogo kongressa Metallurgiya chuguna – vyzovy XXI veka [Recommendations of the VIII International Congress Iron Metallurgy - Challenges of the 21st Century]. *Metallurgiya chuguna – vyzovy XXI veka. Trudy VIII Mezhdunarodnogo kongressa domenshchikov* [Iron metallurgy - challenges of the XXI century. Proceedings of the VIII International Blast Furnace Congress], Moskva: Izd.dom Kodeks, 2017, 609-612 (in Russian).
3. *Materialy 26-y Konferentsii Domenshchikov Ukrainy* [Materials of the 26th Conference of Ukraine blast furnace] (11-12 oktyabrya 2017 g), CHAO MMK im. Il'icha, Available at: <https://fex.net>
4. *Volkov YU.P., Shparber L.YA., & Gusarov A.K.* (1986). *Tekhnolog-domenshchik* [Blast furnace technologist]. Moskva: Metallurgiya, 1986, 263 (in Russian).
5. *Zrazhevskiy A.D.* (2017) *Domennoye proizvodstvo Ukrainy* [Blast furnace production in Ukraine]. *Trudy VIII Mezhdunarodnogo kongressa domenshchikov Metallurgiya chuguna – vyzovy XXI veka* [Proceedings of the VIII International Congress of Blast Furnaces Iron metallurgy - challenges of the XXI century], Moskva: Kodeks, 2017, 35-37 (in Russian).
6. *Lettsel D., Khunger Y., & Kryuger V.* et al. (1999). Protsessy pri vduvanii ugol'nykh pyley v domennuyu pech [Processes for blowing coal fields into a blast furnace]. *Chernyye metally* [Ferrous metals], 1999, 5, 20-28 (in Russian).
7. *Gladkov N.A. & Nesterov A.S.* (1987). Protsessy v sloye zhelezorudnykh materialov pri yego nagrevanii [Processes in a layer of iron ore materials during heating]. *Metally* [Metals], 1987, 3, 9-11 (in Russian).

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2019. - Вип.33

«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33

ISSN 2522-9117 «Fundamental'nye i prikladnye problemy černoј metallurgii». – 2019. – Vypusk 33

8. Zolotukhin YU.A., Andreychikov N. S. & Kukolev YA.B. (2009). Trebovaniya k kachestvu koksa dlya domennykh pechey, rabotayushchikh s razlichnym udel'nyim raskhadom pileugol'nogo topliva [Requirements for the quality of coke for blast furnaces operating with different specific consumption of pulverized coal]. *Koks i khimiya [Coke and chemistry]*, 2009, 3, 25-31 (in Russian).
9. Rudy zheleznyye i margantsevyye, aglomeraty i okatyshi. Metod opredeleniya prochnosti vo vrashchayushchemsya barabane [Iron and manganese ores, agglomerates and pellets. Method for determining strength in a rotating drum], (1987), GOST 15137-87, 6 p.
10. Issledovaniye Nesterov A.S., Garmash L.I. & Lopatenko K.P. et al. (2018). Issledovaniye vysokotemperaturnyyekh svoystv zhelezorudnykh materialov v laboratornykh usloviyakh [Investigation of high-temperature echo properties of iron ore materials in laboratory conditions]. *Fundamental'nyye i prikladnyye problemy chernoy metallurgii Sb. nauchn. tr. ICHM [Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy. Collection of scientific articles ISI NANU]*. Dnepropetrovsk, 2018, 32, 64-79 (in Russian).
11. Gurkin M.A., Gelgorn A.V., Nesterov A.S., Bolshakov V.I., Nevraev V.P., & Denisova S.Yu. et al. RF Patent №2283877. Sposob opredeleniya metallurgicheskoy tsennosti domennogo zhelezorudnogo syr'ya [Method for determining the metallurgical value of blast furnace iron ore raw materials]. (in Russian).

О.С.Нестеров, к.т.н., с.н.с., зав.відділом; ORCID 0000-0002-0183-0327

Л.І.Гармаш, к.т.н., с.н.с; ORCID 0000-0002-9540-3037

Институт черной металлургии им.З.И.Некрасова НАН Украины

Підвищення ефективності доменної плавки за рахунок поліпшення якості залізорудних матеріалів

Анотація Проведено аналіз якості залізорудної сировини, що застосовується в аглодоменному виробництві України і зарубіжних країн. Наведено вимоги міжнародних і вітчизняних стандартів до якості сировини і палива, що забезпечують вдування в горн великих кількостей ПВП. Описано розроблену в ІЧМ методику визначення якості сировини. Наведено результати дослідження якості залізорудної сировини за розробленою методикою. На підставі аналізу результатів проведених досліджень було розроблено вимоги до якості гранульованих залізорудних відходів та їх раціонального кількості у складі агломераційної шихти, а також відпрацьовано процес виробництва гранул. Розроблено рекомендації щодо використання в агломераційній шихті частини гранульованих компонентів вторинних відходів, що дозволило підвищити вміст вторинних ресурсів у шихті. В результаті стабілізовано хімічний склад агломерату, поліпшено його міцність, скорочено вихід агломерату другого сорту, зменшено винос колошнікового пилу і витрати коксу. Підвищення якості агломерату та раціональний розподіл шихтових матеріалів по перетину колошника доменної печі дозволяє забезпечити самовідновлення захисного гарнісажу, скоротити винос колошнікового пилу на 4,3 кг / т чавуну, зменшити витрати коксу на 19,6 кг/т чавуну. Розроблені заходи дозволяють підвищити конкурентоспроможність продукції, навіть при додаткових витратах на підготовку агломераційної шихти до спікання.

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2019. - Вип.33

«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33

ISSN 2522-9117 «Fundamental'nye i prikladnyye problemy černoј metallurgii». – 2019. – Vypusk 33

Ключові слова: доменна піч, якість залізорудної сировини, методика дослідження, агломерат, вторинне залізорудну сировину, гранулювання, спікання

A.S.Nesterov, PhD, Senior Researcher, Head of Department; <https://orcid.org/0000-0002-0183-0327>

L.I.Garmash, PhD, Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-9540-3037>

Iron and Steel Institute named after Z.I. Nekrasov of the NAS of Ukraine

Increasing the efficiency of blast-furnace smelting by improving the quality of iron ore materials

Summery. It is noted in the work that when mastering the technology of pulverized coal injection (PUT) at the metallurgical enterprises of Ukraine, it is necessary to intensify work, including research, in the direction of improving the quality characteristics of the sinter, the stability of its chemical composition and strength parameters. The analysis of the quality of iron ore raw materials used in sintering production in Ukraine and foreign countries is carried out. The requirements of international and domestic standards for the quality of raw materials and fuels, providing for the injection of large quantities of firearms into the furnace, are given. A methodology for determining the quality of raw materials developed in the HMI is described. The results of a study of the quality of iron ore raw materials according to the developed method are presented. Based on the analysis of the results of the research, requirements were developed for the quality of granular iron ore wastes and their rational amount in the composition of the sinter charge, and the process for the production of granules was developed. Recommendations have been developed on the use in the sinter mixture of a part of the granular components of secondary waste, which allowed to increase the content of secondary resources in the mixture. As a result, the chemical composition of the sinter was stabilized, its strength was improved, the yield of sinter of the second grade was reduced, the removal of blast furnace dust and coke consumption were reduced. Improving the quality of the sinter and the rational distribution of charge materials over the cross-section of the top of the blast furnace allows for self-renewal of the protective skull, to reduce the removal of top dust by 4.3 kg / t of cast iron, and to reduce coke consumption by 19.6 kg / t of cast iron. The developed measures make it possible to increase the competitiveness of products, even at the additional cost of preparing the sinter mixture for sintering.

Keywords: blast furnace, quality of iron ore raw materials, research methodology, agglomerate, secondary iron ore raw materials, granulation, sintering

For citation: Nesterov A.S., Garmash L.I. Povysheniye effektivnosti domennoy plavki za schet uluchsheniya kachestva zhelezorudnykh materialovmetallurgii. [Improving the efficiency of blast furnace smelting by improving the quality of iron ore materials.]. «Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii». [Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy] 2020, 34. 43-60. (In Russian). DOI 10.52150/2522-9117-2019-33-43-60

Статья поступила в редакцию сборника 17.11.2019 года, прошла внутреннее и внешнее рецензирование (Протокол заседания редакционной коллегии сборника №2 от 23 декабря 2019 года)

Ю.С. Семенов, к.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0003-2299-5742

Є.І. Шумельчик, к.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0001-5350-6425

В.В. Горупаха, наук.співр., ORCID 0000-0003-0531-1871

Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України

РОЗРОБКА І ВПРОВАДЖЕННЯ НОВИХ ПІДХОДІВ ДО ДІАГНОСТИКИ ТА УПРАВЛІННЯ ДОМЕННОЮ ПЛАВКОЮ

Анотація. Для умов перехідних режимів доменної плавки з метою забезпечення її стабільності при зміні якісного і кількісного складу компонентів шихтових матеріалів, а також при зміні паливних добавок в дутті науково обгрунтовано комплексне використання інформації сучасних засобів автоматизованого контролю: стаціонарних термозондів і термопар футерівки по висоті і окружності доменної печі. Розроблено нові підходи до вибору раціональних програм завантаження, що використовують принцип формування змінного максимуму рудного навантаження уздовж радіусу печі в рамках циклу завантаження для умов роботи на шихті низької якості. Реалізація такої програми завантаження протягом наступних трьох років дозволила забезпечити стабільний і економічний хід плавки, а її адаптація під технологію використання пиловугільного палива дозволила зменшити температури газового потоку периферійної зони по всій висоті доменної печі, а також забезпечити збереження системи охолодження при освоєнні пиловугільного палива без футерівки. Розроблений та реалізований на трьох доменних печах експертний модуль коригування програми завантаження з використанням встановлених раціональних діапазонів зміни температурних показників розподілу газового потоку по радіусу печі в різних технологічних умовах доменної плавки. Розроблений і випробуваний метод обгрунтованого вибору розташування закритих повітряних фурм або повітряних фурм різного діаметру з використанням інформації про зміну температур футерівки по висоті і окружності доменної печі. Удосконалений і впроваджений метод вирівнювання теоретичної температури горіння по окружності доменної печі створенням нерівномірної витрати пиловугільного палива по повітряних фурмах. Розроблено основні технологічні вимоги до задувки доменної печі після її тривалої зупинки без випуску «козлового» чавуну і вигрівання матеріалів з печі, використання яких перед і в процесі задувок доменних печей Єнакієвського металургійного заводу та Дніпровського металургійного комбінату після тривалої стоянки сприяли виведенню печей на задані планово-економічні показники, забезпечили при цьому збереження вогнетривкої футерівки, конструкцій і обладнання.

Ключові слова: доменна піч, програма завантаження, БЗП, термозонд, якість коксу, пиловугільне паливо, вміст окатишів в шихті, футерівка, задувка доменної печі.

Посилання для цитування: Семенов Ю.С., Шумельчик Є.І., Горупаха В.В. Розробка і впровадження нових підходів до діагностики та

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії. – 2019. – Вип.33

«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33

ISSN 2522-9117 «Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii». – 2019. – Vypusk

управління доменною плавкою. //«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2019. - Вип.33. – С.61-77. (In Ukrainian).
DOI 10.52150/2522-9117-2019-33-61-77

Сучасний стан проблеми. Статтю представлено за матеріалами наукової роботи, удостоєної премії Президента України для молодих вчених у 2018 р. (Указ Президента України №419/2018 від 07.12.2018 р.) та монографії «Діагностика та управління доменною плавкою в змінних паливно-сировинних умовах» (2018 р., 260 с.) [1]. Сучасне доменне виробництво України, в порівнянні з провідними світовими виробниками чавуну: Китаєм, Японією та Індією, знаходиться в складному становищі – в умовах постійного зниження собівартості виплавки чавуну без необхідного обсягу інвестицій, спрямованого на модернізацію та реалізацію довгострокових інноваційних проектів, що дозволили б зайняти більш високі позиції в світовому рейтингу. Зниження собівартості виробництва чавуну здійснюється шляхом використання низькоякісних залізорудної сировини і коксу, а також при повній або частковій відмові від коштовного природного газу з переходом на технологію вдування пиловугільного палива (ПВП) [1–4]. В окремі періоди роботи доменних печей (ДП), у випадках зниження інтенсивності плавки з тих чи інших, часом кон'юнктурних, причин, переходять на технологію без природного газу із зволоженням дуттям, яка сприяє суттєвій витраті коксу на виплавку чавуну.

Мета роботи. З метою виходу на прийнятні техніко-економічні показники плавки в такій ситуації актуальним стає розробка нових ефективних способів управління процесами доменної плавки в сформованих змінних шихтових і паливних умовах, а також в перехідні періоди роботи. Використання цих методів дозволяє отримати прийнятні техніко-економічні показники доменної плавки в сучасних умовах виробництва чавуну. Необхідною умовою розробки нових способів управління є оснащення доменних печей сучасними засобами контролю процесів (стаціонарні термозонди, термопари футерівки шахти, розпару та заплечиків тощо), на підставі інформації яких встановлені нові залежності і зв'язки, що пояснюють протікання в об'ємі доменної печі різних процесів.

Основні результати дослідження. Представлені в першій частині статті дослідження і розробки виконані на ДП №3 Єнакієвського металургійного заводу (СМЗ) (корисний об'єм 1719 м³, безконусний безвантажувальний пристрій (БЗП), 24 повітряні фурми) протягом періоду її роботи після реконструкції: з жовтня 2011 по грудень 2016 р. [1, 3–24]. Вибір ДП №3 в якості основного об'єкта досліджень обумовлений застосуванням на ній технології зі змінним якісним і кількісним складом шихтових матеріалів в різних газо-дуттєвих і паливних режимах роботи. Так, в досліджуваних періодах роботи ДП №3 були використані різні паливні добавки до дуття в широких діапазонах їх зміни. На доменних печах використовували технології: з природним газом в дутті, без паливних добавок (т.зв. технологія на «безгазовій шихті») зі зволоженням дуттям, технологію спільної подачі природного газу і пиловугільного палива на початкових етапах освоєння ПВП, а також з витратами ПВП до 130 кг/т чавуну. Склад шихтових

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2019. - Вип.33

«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33

ISSN 2522-9117 *«Fundamental'nye i prikladnye problemy černoј metallurgii». – 2019. – Vypusk*

матеріалів характеризувався багатокомпонентністю і змінною якістю. Так, наприклад, вміст окатишів в суміші з агломератом змінювався від 10 до 90%, агломерат використовувався як виробництва місцевої аглофабрики зі значною кількістю в ньому вторинних ресурсів, так і привізний. У складі шихти також використовували різноманітні добавки: залізню руду, вапняк, конвертерний шлак, брикети з відсіву окатишів, марганцевмісні добавки, що володіють ефектом промивок горна [26]. Якість коксу при цьому змінювалась в широкому діапазоні, використовували кокс як місцевого виробництва, так і привізний від широкого спектра постачальників.

Робота ДП №3 в таких умовах вимагала постійного коригування технології ведення доменної плавки: зміни режимів завантаження, забезпечення промивок горна для поновлення коксової насадки та коригування параметрів дуттєвого режиму. ДП №3 за рівнем оснащення сучасними засобами контролю відповідає світовим стандартам, що дозволяє з використанням їх інформації розробити нові методи контролю і управління доменної плавкою. Оснащення ДП №3 сучасним лотковим БЗП фірми «Paul Wurth» дозволило використовувати на печі різні варіанти режиму завантаження, спрямовані на підвищення техніко-економічних показників плавки в змінних умовах виробництва [5, 7–9]. БЗП фірми «Paul Wurth», встановлене на ДП №3, по ряду основних параметрів і конструктивних особливостей не має аналогів в Україні, цей апарат являє собою однотрактне БЗП, що передбачає можливість завантаження шихтових матеріалів з температурою до 400 °С.

В останній час доменне виробництво України, як взагалі вся металургійна галузь переживає важкі часи. Через брак сировини доменні цехи часто тривалий час простоюють. У зв'язку з чим, доменні печі зупиняють на термін, що перевищує допустимий, відповідно до вимог технологічних інструкцій ведення технології. У роботі представлені результати задувок доменних печей після їх тривалої зупинки із застосуванням нових удосконалених підходів, які дозволили безаварійно вивести печі на робочі показники [16]. Цей досвід, хоча і змушений, однак, на жаль, є актуальним для сучасних реалій виробництва чавуну в Україні.

Науково-технічні результати.

Перед пуском ДП №3 ЄМЗ після її реконструкції виконано дослідження параметрів потоків шихтових матеріалів, що завантажуються в піч за допомогою БЗП, розподілу маси порцій і їх компонентів на колошнику, визначені витратні характеристики шихтового затвору бункера БЗП, а також дослідження формування профілю поверхні засипу шихти, гранулометричного і компонентного складів шару залізовмісних матеріалів по радіусу колошника. Виконаний комплекс досліджень дозволив після задувки печі визначити і реалізувати режими роботи механізмів БЗП, необхідні для ефективного застосування раціональних програм завантаження доменної печі [1, 5].

Розроблено та реалізовано на ДП №3 модельну систему для підтримки прийняття рішень по вибору і коригуванню програм завантаження, що дозволяє технологічному персоналу приймати адекватні

управляючі рішення по зміні режимів завантаження печі. Крім основної функції, використання системи націлене було також на навчання технологічного персоналу в умовах освоєння нового завантажувального пристрою [1, 6].

В умовах нестабільної якості шихтових матеріалів розроблено новий підхід до вибору раціональних програм завантаження БЗП, заснований на зменшенні кількості робочих кутових положень лотка і зміщенні від порції до порції в рамках циклу завантаження умовних «гребенів» (максимумів рудного навантаження) уздовж радіуса колошника. Позитивний досвід реалізації такої програми завантаження показаний на прикладі ДП №3 ЄМЗ, де понад три роки (з 2013 р.) вона з деякими коригуваннями використовувалася і забезпечувала поряд з іншими заходами високі техніко-економічні показники. На підставі запропонованого підходу були також розроблені та реалізовані варіанти програми завантаження для роздувочного періоду печі і для режимів роботи з високим вмістом окатишів в складі шихти [1, 8, 9, 17, 23, 24].

Запропонована методика вибору раціональних кутів нахилу розподільного лотка БЗП при зміні конфігурації його футерівки. Розроблено заходи з оперативного управління периферійним газовим потоком, в тому числі при переході на технологію вдування пилотовугільного палива. Розроблено та реалізовано рекомендації з управління окружним розподілом шихтових матеріалів на ДП, які дозволили зменшити нерівномірність температур футерівки верхніх горизонтів шахти доменної печі. Сформульовані і внесені доповненням в технологічну інструкцію по доменному виробництву вимоги до програми завантаження задувочної шихти після проведення капітального ремонту з шоткретуванням шахти [1, 9, 24].

Розроблено вимоги до розподілу газового потоку по радіусу печі, необхідні при його регулюванні в умовах вдування в горн ПВП для досягнення заданих або високих техніко-економічних показників плавки. Показано, що при управлінні газорозподілом по радіусу печі при вдуванні в горн ПВП необхідно забезпечити достатню газопроникність периферійної зони, не допускаючи зайвого навантаження її залізородними матеріалами, забезпечити розвинений центральний газорозподіл з одночасним розвиненим взаємним перетіканням газів між периферією і центром, при розвиненому центральному газорозподілі для підвищення економічності плавки необхідно забезпечити вузьку осьову коксову віддушину [1, 3, 13, 14].

Освоєння технології вдування ПВП на ДП ЄМЗ в змінних шихтових умовах і з роботою на коксі зниженої якості при використанні раціональних режимів завантаження, формування порцій і раціонального

шлакового режиму дозволили в 2016 р. довести витрату ПВП, в середньому, до 130 кг/т чавуну. Оперативний контроль показань термопар футерівки дозволив своєчасно здійснювати як гарнісажуєтворюючі заходи, так і коригувати розподіл компонентів шихтових матеріалів по радіусу і окружності печі. Реалізація змін програми завантаження згідно до розроблених вимог і режиму формування порцій дозволила при роботі ДП без футерівки на початковому етапі освоєння ПВП знизити температури периферійного газового потоку по всій висоті печі, в середньому, на 13% і зменшити окружну нерівномірність температур на 11%. Використання в технології раціональних режимів завантаження при вдуванні ПВП дозволило до шоткретування забезпечити експлуатаційну стійкість системи охолодження і безаварійну роботу доменних печей [1, 3].

Встановлено особливості зміни температури над поверхнею засипу шихти в залежності від витрати палива та вмісту окатишів в пристінній зоні, що відкриває можливість подальшого використання інформації термозондів для оперативного управління газовим потоком. Інформація, що отримується від стаціонарних термозондів, дозволяє контролювати вміст окатишів в периферійній зоні печі, що вкрай важливо при формуванні захисного гарнісажу в печі [1, 11, 14, 23].

В результаті досліджень встановлено відсутність впливу на характер розподілу температур газового потоку над поверхнею засипу по радіусу печі температури доменної шихти при її завантаженні, як в цілому, так і в окремих зонах перерізу печі по радіусу, температури газового потоку збільшуються пропорційно збільшенню кількості гарячого агломерату у складі шихти. Отримані результати дозволяють використовувати інформацію термозондів для управління завантаженням при різному компонентному складі шихтових матеріалів [1, 11, 14, 23].

Розроблено температурні показники розподілу газового потоку по радіусу доменної печі. Показники характеризують чотири основні характеристики температури газового потоку над поверхнею шихти: інтенсивність периферійного газового потоку, інтенсивність осьового газового потоку, газопроникність проміжної зони, ширину осьової коксової віддушини. Для ДП №3 з БЗП і ДП №5 з конусним завантажувальним пристроєм (КЗП) встановлені їх оптимальні діапазони зміни при роботі доменних печей в різних газодинамічних і паливних умовах: при роботі з використанням в дутті збільшеної кількості водяної пари (на т.зв. «безгазовій шихті»), з природним газом, з природним газом та пиловугільним паливом, окремо з пиловугільним паливом. На основі запропонованої

Виконано аналіз динаміки зміни температур футерівки заплечиків, розпару і шахти ДП №3 за п'ять років її експлуатації – з грудня 2011 р. по

вересень 2016 р. В результаті аналізу зміни температур футерівки виявлені технологічні чинники, що впливають на середньомісячні значення температури футерівки ДП. Так, на температури футерівки верхньої зони в більшій мірі впливає знос футерівки, на температури футерівки нижньої зони – формування стійкого гарнісажу. Встановлено фактори, що впливають на зміну середньоквадратичних відхилень температур футерівки по окружності печі: якість залізовмісних матеріалів і коксу, програма завантаження печі і режим формування порцій, захаращення горна і використання промивних матеріалів, параметри дутевого режиму з використанням різних паливних добавок, знос футерівки [1, 10, 12, 21].

Визначено граничні значення середньомісячних температур, які свідчать про частковий (~50%) або повний знос футерівки шахти, а також граничні значення температур нижньої зони печі, які характеризують наявність стійкого гарнісажу. Встановлено, що середньомісячна температура футерівки середини і верху шахти – 375–400 °С свідчить про її знос на ~50% (підтверджено геодезичними вимірюваннями двічі – в середині 2013 р., та на початку 2016 р.), потім руйнування футерівки сповільнюється. При перевищенні середньомісячною температурою значення 450 °С, як показали дві кампанії ДП, футерівка середини і верху шахти повністю відсутня. При середньомісячній температурі футерівки низу шахти, розпару та заплечиків – 300 °С має місце утворення в нижній зоні печі нестійкого гарнісажу, що вимагає прийняття рішень щодо коригування складу і режиму формування порцій шихти. Перевищення температурою футерівки нижньої зони значення 350 °С свідчать про повну відсутність захисного гарнісажу та (або) футерівки [1, 12, 21].

Прийнято, що одним з показників стабільного ходу печі можуть бути середньоквадратичні відхилення температур футерівки по окружності печі. Встановлено, що при порушеннях ходу печі середньоквадратичні відхилення температур перевищують величину $0,2 \cdot T_{\text{СЕР}}$, де $T_{\text{СЕР}}$ – середньомісячна температура футерівки шахти. Так, для рівнів установки термопар футерівки середини і верху шахти ДП №3 величина середньоквадратичного відхилення температур по окружності печі не повинна перевищувати 60 °С, а допустима межа середньоквадратичного відхилення температур футерівки низу шахти, розпару та заплечиків становить 40 °С [1, 12].

Виконано аналіз зміни температур, що реєструються термопарами футерівки шахти в періодах роботи доменної печі при практично повному зносі футерівки. Дана температура була ідентифікована як температура периферійного газового потоку і аналіз її зміни було виконано при роботі доменної печі в різних газодинамічних і паливних умовах: на «безгазовій

шихті», з природним газом, з природним газом і пиловугільним паливом, з пиловугільним паливом. У досліджуваних різних газодинамічних і паливних умовах визначено екстремум кривої зміни температури периферійного газового потоку в нижній частині доменної печі, який прийнятий за положення кореня зони в'язко-пластичного стану. Результати, отримані раніше німецькими дослідниками свідчать на користь цієї гіпотези [1, 15].

Розроблений і випробований метод обґрунтованого вибору розташування закритих повітряних фурм або повітряних фурм різного діаметру з використанням інформації про зміну температур футерівки по висоті і окружності доменної печі. В дослідних періодах роботи ДП №3, при використанні методу, в результаті зміни розташування закритих фурм зменшилися як окружна нерівномірність температур футерівки, так і середні значення температур. Так, середня температура футерівки низу шахти, розпару та заплечиків зменшилася на 33 °С – від 264 до 231 °С, а температура футерівки середини і верху шахти зменшилася на 88 °С – від 476 до 388 °С, що обумовлено перерозподілом інтенсивності газового потоку. Крім того, в результаті використання запропонованого методу перерозподіл газового потоку сприяв зменшенню питомої витрати коксу на 1,7% при практично незмінних витратах ПВП і коксового горіха, температури дуття, а також якісних та кількісних характеристик залізорудної сировини та коксу [1, 18].

Розроблено основні технологічні вимоги до задувки ДП №3 і ДП №5 після їх тривалих зупинок [1, 16]. На підставі позитивного досвіду таких задувок після тривалих, понад нормативного часу, стоянок без випуску «козлового» чавуну і вигрібання матеріалів з печі, сформульовані наступні основні вимоги до задувки:

- зменшене, в порівнянні з традиційним, рудне навантаження на об'єм задувочної шихти ($\sim 0,10\text{--}0,15$ т/т);
- використання в шихті першого об'єму і перших робочих шихт легкоплавких матеріалів невисокої основності (наприклад, доменний шлак 50–100%, плавиковий шпат в перших шихтах), в тому числі, передбачити можливість подачі легкоплавких матеріалів через повітряні фурми;
- секторна задувка з боку розташування чавунної льотки на малій кількості повітряних фурм (на початку задувки 1–2 фурми), забезпечення до початку задувки впевненого прогріву по висоті льотка-повітряна фурма, шляхом установлення в чавунну льотку труб, через які подається природний газ і повітря для його горіння, забезпечення швидкості потоку дуття на виході з повітряної фурми не менше 150 м/с;

- низька інтенсивність нарощування газодуттєвих параметрів на початковому етапі задувки (витрата 1 м³ дуття/м³ об'єму на 5–7 добу та нарощування 1,6–1,8 м³ дуття/м³ об'єму через 10–15 діб);

- низька інтенсивність відкриття повітряних фурм в одному секторі (по 1–2 фурми на добу до досягнення 50% відкритих фурм через 7–10 днів) та перехід до секторного окружного відкриття фурм до кількості 75%, тривалістю 3–5 діб при забезпеченні нарощування кількості проплавляємої шихти і газодинамічних параметрів дуття;

- зменшене, в порівнянні з прийнятим, рудне навантаження перших робочих шихт при пониженому вмісті заліза в шихті (1,0–1,5–2,0 т/т, що забезпечує утримання вмісту кремнію в чавуні ~ 5,0% в перші три доби, перехід на ливарний чавун в наступні 2–4 доби).

Заходи, виконані перед і в процесі задувок доменних печей Єнакієвського металургійного заводу після тривалої стоянки сприяли виведенню печей на задані планово-економічні показники, забезпечили при цьому збереження вогнетривкої футерівки, конструкцій і обладнання.

Наукова новизна результатів. Обґрунтовано новий підхід до вибору раціональних програм завантаження, що забезпечує стабільний економічний хід доменної печі при зміні технологічних умов плавки; вперше розроблені температурні показники оцінки розподілу газового потоку по радіусу печі, встановлено їх раціональні діапазони зміни при роботі в різних газодинамічних і паливних умовах, вперше сформульовані вимоги до розподілу температур газового потоку по радіусу печі; вперше на основі аналізу температур футерівки по висоті печі протягом п'яти років її експлуатації встановлені граничні значення температур, при яких футерівка середини і верху шахти частково або повністю вироблена, для футерівки низу шахти, розпару і заплечиків встановлені: температура, яка свідчить про утворення в нижній зоні печі нестійкого захисного гарнісажу і температура, що характеризує повну його відсутність; вперше досліджено вплив дуттєвого режиму при використанні в ньому збільшеної кількості водяної пари, природного газу, природного газу із пиловугільним паливом та окремо пиловугільного палива на зміну форми кривої розподілу температури периферійного газового потоку по висоті печі від фурменної зони до колошника, що стало передумовою для розробки методу ідентифікації межі зони в'язко-пластичного стану в периферійній зоні печі.

Подальший розвиток досліджень. Після втрати Україною контролю над металургійними підприємствами, розташованими в окремих районах Донецької та Луганської областях, багаторічне співробітництво з Єнакієвським металургійним заводом було припинено. Подальший розвиток представлених досліджень було отримано на Дніпровському

металургійному комбінаті (ДМК) (м. Кам'янське, Дніпропетровської області) починаючи з вересня 2017 р. До доменного цеху ДМК входять три доменні печі: ДП №1М (корисний об'єм 1500 м³, КЗП, 20 повітряних фурм), №9 (корисний об'єм 1386 м³, КЗП, 18 повітряних фурм) та №12 (корисний об'єм 1386 м³, КЗП, 16 повітряних фурм).

За два роки виконання науково-дослідних робіт на ДМК було отримано наступні основні науково-технічні результати.

Вперше в Україні розроблено та впроваджено комплекс заходів щодо забезпечення раціонального розподілу ПВП по повітряним фурмам [1,25]. Виконано виміри теплових навантажень на охолоджуваних елементах фланців підвішеного (рухомого) коліна фурменого приладу, що дозволили оцінити окружний розподіл теплового стану фурменої зони за показником теоретичної температури горіння і для її вирівнювання реалізувати спрямовану нерівномірність витрати ПВП. В результаті визначення нерівномірності витрати дуття на досліджуваних доменних печах встановлено визначальний вплив конфігурації підводу тракту гарячого дуття в місці врізки в кільцевий трубопровід, що призводить до утворення постійної зони зі зниженою витратою дуття на окремих повітряних фурмах. Ефективність тривалого дослідно-промислового впровадження спрямованої нерівномірності витрати ПВП по окружності доменних печей з метою створення рівномірного окружного розподілу теоретичної температури горіння, склала: на ДП №12 – 4,7% економії приведені витрати коксу при зменшенні на 12% коливання вмісту кремнію в чавуні на випуску та на ДП №1М – 3,9% економії питомої витрати коксу при зменшенні температури периферійного газового потоку на 100–120 °С. При цьому ефективність впровадження нерівномірності розподілу ПВП на ДП №12 спостерігалась при роботі з кількістю ПВП в дутті до 120 кг/т чавуну [25], що в тому числі, сприяло в подальшому впровадити за рекомендацією ІЧМ збільшення діаметру повітряних фурм від 140 до 150 мм. На ДП №1М тенденція зниження температури периферійного газового потоку спостерігалась до періоду роботи печі без збагачення дуття киснем, що було обґрунтовано економічними чинниками і погіршило роботу печі. Для ефективного контролю розподілу дуття по повітряним фурмам доменної печі і подальшої зміни розподілу ПВП по окружності печі з метою вирівнювання або створення заданої нерівномірності теоретичної температури горіння рекомендовано впровадження системи автоматизованого контролю, яка включає установку на кожний фурменний прилад витратоміра води, що надходить на охолоджувані елементи фланців підвішеного (рухомого) коліна фурменого приладу, термопари на ділянці зливного трубопроводу після охолодження і підсистеми візуалізації інформації зміни теплових

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2019. - Вип.33

«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33

ISSN 2522-9117 *«Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii». – 2019. – Vypusk*

навантажень, витрат пиловугільного палива, фактичної і рекомендованої теоретичної температури горіння.

Для умов ДП №9 ДМК, обладнаної конусним завантажувальним пристроєм, встановлені оптимальні діапазони зміни температурних показників оцінки розподілу газового потоку по радіусу для періодів роботи ДП №9 при вдуванні ПВП від 130 до 160 кг/т чавуну [19, 20]. Розроблено і пройшов дослідно-промислове випробування експертний модуль системи термозондів (по аналогії з реалізацією експертного модуля на доменних печах ЄМЗ), що генерує коригувальні дії режиму завантаження.

В умовах ЄМЗ з лютого 2013 р. і ДМК з березня 2019 р. відпрацьована технологія використання в складі доменної шихти марганцевмісних матеріалів (брикетів і підготовленого концентрату), що надає один з найбільших промивних ефектів при їх раціональному формуванні в циклі завантаження подачі і сприяє підтримці технологічної стійкості роботи доменної печі в умовах низької і нестабільної якості шихтових матеріалів і при вдуванні великої кількості ПВП, а також розширює можливості застосування технологічних прийомів і заходів для зниження витрати коксу, таких як введення в шихту коксового горіха до 25–40 кг/т чавуну. Встановлено, що з введенням в шихту марганцю знижується коливання теплового стану, виражене в зменшенні середньоквадратичного відхилення кремнію в чавуні, зменшується витрата коксу на 4%. Встановлено, що при виробництві чавуну раціональним діапазоном вмісту марганцю в чавуні є 0,25–0,35% [26].

В умовах браку коксівного і слабкоспівкливого вугілля у галузі влітку 2019 р. відпрацьована технологія спільного використання пиловугільного палива і природного газу. Практично доведена ефективність цієї технології, яка сприяє збільшенню температури вугільного пилу за рахунок більш раннього його займання і виділення теплоти від спалювання. У зв'язку з конструктивними особливостями повітряних фурм в доменному цеху (один підвід природного газу з максимально можливою витратою 360 м³/год) було прийнято рішення на ДП №1М природний газ подавати через одну повітряну фурму на спис введення ПВП (580 м³/год), на інші фурми подавалося 360 м³/год через наявний підвід і 1,0 т/год ПВП. На ДП №12 на всі повітряні фурми подавалося до 360 м³/год природного газу і 0,7 т/год ПВП. В результаті промислового впровадження технології спільного використання ПВП і природного газу встановлено оптимальне співвідношення паливних добавок в дутті: ПВП – 110–120 кг/т чавуну, та природного газу – 40–50 м³/т чавуну. Ефективність цієї технології склала 3% економії питомої витрати коксу при збільшенні коефіцієнтів заміни коксу природним газом від 0,80 до

0,93 од. Слід зазначити, що ефективність спільного використання ПВП та природного газу була отримана при погіршенні якості вугілля, що використовувався для ПВП, за рахунок використання антрацитового вугілля. Так, в середньому, кількість летючих речовин вугілля зменшилася від 19,4 до 16,5 % при збільшенні стандартного відхилення цього показника від 0,24 до 0,38 %.

В умовах кризи металургійної галузі у 2019 р. дві доменні печі ДМК були зупинені на термін, що перевищує допустимий (45 діб) без попереднього випуску залишкового («козлового») чавуну. Так, доменна піч №9 була зупинена на 147 діб, доменна піч №12 – на 110 діб. Завдяки використанню розроблених ІЧМ рекомендацій щодо задувок [1, 16], доменні печі наприкінці 2019 р. було безаварійно введено в експлуатацію з досягненням планових показників.

Висновки.

З метою забезпечення стабільності доменної плавки при зміні якісного і кількісного складу компонентів шихтових матеріалів, а також при зміні паливних добавок в дутті, науково обгрунтовано комплексне використання інформації сучасних засобів автоматизованого контролю: стаціонарних термозондів і термопар футерівки по висоті і окружності доменної печі. Для виявлення нових закономірностей і зв'язків процесів з подальшим їх застосуванням, для обгрунтування вибору управляючих впливів також запропоновано новий підхід до вибору енергоефективних режимів завантаження. На підставі наведених основних положень задувок, з урахуванням підготовчих заходів і технологічних особливостей, розроблено регламент задувок доменних печей після тривалих зупинок без попереднього випуску «козлового» чавуну, які внесені доповненням в технологічну інструкцію по доменному виробництву. Вперше в Україні розроблено та впроваджено комплекс заходів щодо забезпечення раціонального розподілу ПВП по повітряним фурмам. Ефективність дослідно-промислового впровадження спрямованої нерівномірності витрати ПВП по окружності доменних печей з метою створення рівномірного окружного розподілу теоретичної температури горіння, склала 3,9–4,7% економії приведеної витрати коксу. В умовах двох металургійних підприємств відпрацьована технологія використання в складі доменної шихти марганцевмісних матеріалів, що надає один з найбільших промивних ефектів в умовах низької і нестабільної якості шихтових матеріалів і при вдуванні великої кількості ПВП. Встановлено, що з введенням в шихту марганцю знижується коливання теплового стану, виражене в зменшенні середньоквадратичного відхилення кремнію в чавуні, збільшується виробництво чавуну на 4%, зменшується витрата

коксу на 1,5%. Встановлено, що при виробництві чавуну раціональним діапазоном вмісту марганцю в чавуні є 0,30–0,35%.

Перелік повилань

1. Семенов Ю.С., Шумельчик Є.І., Горупаха В.В. Діагностика та управління доменною плавкою в змінних паливно-сировинних умовах – Дніпро: Домінанта Принт, 2018. – 260 с.
2. Большаков В.И. Применение в Украине технологии доменной плавки с вдуванием пылеугольного топлива / Сборник научных трудов ИЧМ «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии». – 2011. – Вып. 23. – С. 30–36.
3. Podkorytov A.L., Kuznetsov A.M., Zubenko A.V., et al. Introduction of Pulverized-Coal Injection at Yenakieve Iron and Steel Works / Steel in Translation, 2017. – Vol. 47, No. 5, pp. 313–319. <https://doi.org/10.3103/S0967091217050102>
4. Можаренко Н.М., Семенов Ю.С., Горупаха В.В., Шумельчик Е.И. Особенности технологии доменной плавки с применением пылеугольного топлива / Металлургическая и горнорудная промышленность, 2017. – № 5 – С. 2–9.
5. Bolshakov V.I., Semenov Yu.S., Ivancha N.G., et al. Study of the Flow of Burden Materials and their Distribution on the Furnace Top of a Modern Blast Furnace / Metallurgical and Mining Industry, 2012. – Vol. 4, No. 3, pp. 158–165.
6. Semenov Yu.S., Shumelchik E.I., Vishnyakov V.I., et al. Model system for selecting and correcting charging programs for blast furnaces equipped with a bell-less charging apparatus / Metallurgist, January 2013, Volume 56, Issue 9-10, pp. 652-657. <https://doi.org/10.1007/s11015-013-9630-3>
7. Bolshakov V.I., Semenov Yu.S., Kuznetsov A.M. The Experience of the Implementation of Modern Blast Furnace Equipped with Bell-Less Top Charging Device under Conditions of Changing Quality of Charge Materials / Metallurgical and Mining Industry, 2013. – Vol. 5, No. 2, pp. 56–64.
8. Семенов Ю.С. Выбор рациональных режимов загрузки доменной печи, оборудованной БЗУ, для условий работы с малой массой подачи и с нестабильным качеством шихтовых материалов / «Черметинформация». Бюллетень «Черная металлургия», 2013. – № 12. – С. 14–19.
9. Большаков В.И., Семенов Ю.С., Шумельчик Е.И. и др. Реализация энергосберегающей технологии загрузки современной доменной печи в конъюнктурных топливно-сырьевых и технологических условиях / Металлургическая и горнорудная промышленность, 2014. – № 6 – С. 6–14.
10. Semenov Yu.S., Mozhareno N.M., Gorupakha V.V., et al. Effect of the Fuel, Raw Materials, and Process Conditions on the Behavior of Temperature Change in a Blast-Furnace Lining / Metallurgist, July 2015, Vol. 59, Issue 3–4, pp. 290–299. <https://doi.org/10.1007/s11015-015-0099-0>
11. Большаков В.И., Семенов Ю.С., Шумельчик Е.И., и др. Использование информации о температуре над поверхностью засыпи шихты для контроля доменной плавки / Металлургическая и горнорудная промышленность, 2015. – № 3 – С. 2–7.

12. Semenov Yu.S., Shumel'chik E.I., Gorupakha V.V., et al. Monitoring Blast Furnace Lining Condition During Five Years of Operation / Metallurgist, July 2017, Vol. 61, Issue 3–4, pp. 291–297. <https://doi.org/10.1007/s11015-017-0491-z>
13. Нестеров А.С., Семенов Ю.С., Горупаха В.В. и др. Исследование процесса формирования жидких фаз при вдувании пылеугольного топлива в переменных шихтовых условиях / «Черметинформация». Бюллетень «Черная металлургия», 2017. – № 5. – С. 24–28.
14. Semenov Yu.S., Shumelchik E.I., Horupakha V.V., et al. Using Thermal Probes to Regulate the Batch Distribution in a Blast Furnace with Pulverized-Coal Injection / Steel in Translation, 2017. – Vol. 47, No. 6, pp. 389–393. <https://doi.org/10.3103/S0967091217060092>
15. Semenov Yu.S. Temperature Distribution of the Gas Flux in Blast Furnaces – Steel in Translation, 2017. – Vol. 47, No. 7, pp. 473–477. <https://doi.org/10.3103/S0967091217070117>
16. Семенов Ю.С. Основные положения задувки доменной печи после остановки продолжительностью более 80 суток без выпуска козлового чугуна / Ю.С. Семенов, В.В. Горупаха, Е.И. Шумельчик – Черные металлы, 2017. – № 11. – С. 28–36.
17. Semenov Yu.S., Shumel'chik E.I., Gorupakha V.V. Efficient Management of the Charging of Blast Furnaces and the Application of Contemporary Means of Control Over the Variable Technological Conditions / Metallurgist, March 2018, Vol. 61, Issue 11–12, pp. 950–958. <https://doi.org/10.1007/s11015-018-0591-4>
18. Semenov Yu.S., Shumelchik E.I., Horupakha V.V. Blast Furnace Shaft Thermal State Monitoring System / Steel in Translation, 2017. – Vol. 47, No. 11, pp. 728–731. <https://doi.org/10.1007/s11015-018-0591-4>
19. Semenov Yu.S., Shumelchik E.I., Horupakha V.V. Expert Module of the Thermal Probe System for Blast Furnace Charging Control / Steel in Translation, 2018. – Vol. 48, No. 12, pp. 802–806. <https://doi.org/10.3103/S0967091218120136>
20. Семенов Ю.С. Использование информации термозондов для управления загрузкой доменной печи / Металлургическая и горнорудная промышленность, 2018. – № 7 – С. 208–215.
21. Horupakha V.V., Semenov Yu.S., Shumelchik E.I., Vyshinskaya E.D. Trends in the Engineering of Blast Furnaces in Modern Fuel and Raw Materials Conditions / Steel in Translation, 2019. – Vol. 49, No. 2, pp. 110–117. <https://doi.org/10.3103/S0967091219020086>
22. Horupakha V.V., Semenov Yu.S., Shumelchik E.I., Vashchenko S.V. Influence of Transient Blast Furnace Conditions on the Temperature in the Cooling System / Steel in Translation, 2019. – Vol. 49, No. 6, pp. 397–401. <https://doi.org/10.3103/S0967091219060056>
23. Семенов Ю.С. Новые подходы в управлении загрузкой доменной печи, оборудованной БЗУ, в современных условиях работы / Познание процессов и развитие технологии доменной плавки: коллективный труд второго международного симпозиума под научной редакцией д.т.н., проф. И.Г. Товаровского. – Днепр: ЖУРФОНД, 2016. – 382 с. (С. 272–285).
24. Большаков В.И., Семенов Ю.С., Шумельчик Е.И. и др. Освоение энергосберегающей технологии загрузки доменной печи, оборудованной БЗУ, в «Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2019. – Вып.33 «Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33 ISSN 2522-9117 «Fundamentalnye i prikladnye problemy černoj metallurgii». – 2019. – Vypusk

конъюнктурных топливно-сырьевых и технологических условиях / Сб. научн. тр. ИЧМ «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии», 2014. – Вып. 28. – С. 57–80.

25. Эффективность реализации окружной неравномерности распределения ПУТ по воздушным фурмам доменной печи / [Ю.С. Семенов, В.В. Горупаха, И.Ю. Семион, А.Ю. Оробцев, Е.И. Шумельчик] – Черные металлы, 2019. – № 10. – С. 11–16.
26. Experience of Using Manganese-Containing Materials in Blast-Furnace Charge / [Yu.S. Semenov, V.V. Gorupakha, A.M. Kuznetsov, I.Yu. Semion, E.I. Shumel'chik, S.V. Vashchenko, A.Yu. Khudyakov] – Metallurgist, January 2020, Volume 63, Issue 9–10, pp. 1013–1023. <https://doi.org/10.1007/s11015-020-00920-1>

References

1. Semenov Yu.S., Shumelchik E.I. & Horupakha V.V. (2018). *Diahnostyka ta upravlinnya domennoyu plavkoyu v zminnykh palyvno-syrovynnykh umovakh* [Diagnostics and Management of Blast Furnace Smelting in Variable Fuel and Raw Materials Conditions]. Dnipro: Dominanta Print, 2018, 260 p. (in Ukrainian).
2. Bol'shakov V.I. (2011). Primeneniye v Ukraine tekhnologii domennoy plavki s vduvaniyem pyleugol'nogo topliva [Application of blast furnace smelting technology with pulverized-coal injection in Ukraine]. *Fundamental'nyye i prikladnyye problemy chernoy metallurgii. Sb.nauchn.tr.ICHM* [Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy. Collection of scientific articles ISI NANU], 2011, 23, 30–36. (In Russian).
3. Podkorytov A.L., Kuznetsov A.M. & Zubenko A.V. et al. (2017). Introduction of Pulverized-Coal Injection at Yenakiieve Iron and Steel Works. *Steel in Translation*, 2017, Vol. 47, 5, 313–319. <https://doi.org/10.3103/S0967091217050102>
4. Mozhareno N.M., Semenov Yu.S., Horupakha V.V. & Shumelchik E.I. (2017). Osobennosti tekhnologii domennoy plavki s primeneniym pyleugol'nogo topliva [Features of Blast Furnace Technology With the Use of Pulverized-Coal Injection]. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'* [Metallurgical and mining industry], 2017, 5, 2–9. (In Russian).
5. Bolshakov V.I., Semenov Yu.S. & Ivancha N.G. et al. (2012). Study of the Flow of Burden Materials and their Distribution on the Furnace Top of a Modern Blast Furnace. *Metallurgical and mining industry*, 2012, Vol. 4, 3, 158–165.
6. Semenov Yu.S., Shumelchik E.I. & Vishnyakov V.I. et al. (2013). Model system for selecting and correcting charging programs for blast furnaces equipped with a bell-less charging apparatus. *Metallurgist*, 2013, Vol. 56, 9–10, 652–657. <https://doi.org/10.1007/s11015-013-9630-3>
7. Bolshakov V.I., Semenov Yu.S. & Kuznetsov A.M. (2013) The Experience of the Implementation of Modern Blast Furnace Equipped with Bell-Less Top Charging Device under Conditions of Changing Quality of Charge Materials. *Metallurgical and Mining Industry*, 2013, Vol. 5, 2, 56–64.
8. Semenov Yu.S. (2013). Vybór ratsional'nykh rezhimov zagruzki domennoy pechi, oborudovannoy BZU, dlya usloviy raboty s maloy massoy podachi i s nestabil'ny'm «Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2019. – Вып.33 «Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33 ISSN 2522-9117 «Fundamental'nye i prikladnyye problemy černej metallurgii». – 2019. – Vypusk

- kachestvom shikhtovykh materialov [Selection of rational regimes of loading of a blast furnace equipped with cone-free charging devices for operation with low mass of supply and unstable quality of charge materials]. *Chermetinformatsiya. Byulleten' Chernaya metallurgiya [Ferrous Metallurgy Bulletin]*, 2013, 12, 14–19. (In Russian).
9. Bolshakov V.I. Semenov Yu.S. & Shumel'chik E.I. et al. (2014). Realizatsiya energosberegayushchey tekhnologii zagruzki sovremennoy domennoy pechi v kon'yunktynykh toplivno-syr'yevykh i tekhnologicheskikh usloviyakh [Implementation of energy saving technology for a contemporary blast furnace under competitive fuel, raw material, and production conditions]. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost' [Metallurgical and mining industry]*, 2014, 6, 6–14. (In Russian).
 10. Semenov Yu.S., Mozhareno N.M. & Gorupakha V.V., et al. (2015). Effect of the Fuel, Raw Materials, and Process Conditions on the Behavior of Temperature Change in a Blast-Furnace Lining. *Metallurgist*, 2015, Vol. 59, 3–4, 290–299. <https://doi.org/10.1007/s11015-015-0099-0>
 11. Bol'shakov V.I., Semenov Yu.S. & Shumel'chik E.I. et al. (2015). Ispol'zovaniye informatsii o temperature nad poverkhnost'yu zasypi shikhty dlya kontrolya domennoy plavki [The use of information on temperature over the surface of the charging bed to control blast furnace smelting]. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost' [Metallurgical and mining industry]*, 2015, 3, 2–7. (In Russian).
 12. Semenov Yu.S., Shumel'chik E.I. & Gorupakha V.V. at al. (2017). Monitoring Blast Furnace Lining Condition During Five Years of Operation. *Metallurgist*, 2017, Vol. 61, 3–4, 291–297. <https://doi.org/10.1007/s11015-017-0491-z>
 13. Nesterov A.S., Semenov Yu.S., & Gorupakha V.V. et al. (2017). Issledovaniye protsessa formirovaniya zhidkikh faz pri vduvani pyleugol'nogo topliva v peremennykh shikhtovykh usloviyakh [Study of the process of liquid phase formation during injection of pulverized coal fuel under the variable charge condition]. *Chermetinformatsiya. Byulleten' Chernaya metallurgiya [Ferrous Metallurgy Bulletin]*, 2017, 5, 24–28. (In Russian).
 14. Semenov Yu.S., Shumel'chik E.I. & Gorupakha V.V. at al. (2017). Using Thermal Probes to Regulate the Batch Distribution in a Blast Furnace with Pulverized-Coal Injection. *Steel in Translation*, 2017. Vol. 47, 6, 389–393. <https://doi.org/10.3103/S0967091217060092>
 15. Semenov Yu.S. (2017). Temperature Distribution of the Gas Flux in Blast Furnaces. *Steel in Translation*, 2017, Vol. 47, 7, 473–477. <https://doi.org/10.3103/S0967091217070117>
 16. Semenov Yu.S., Gorupakha V.V. & Shumelchik E.I. (2017). Osnovnyye polozheniya zaduvki domennoy pechi posle ostanovki prodolzhitel'nost'yu boleye 80 sutok bez vypuska kozlovogo chuguna [The basic conditions of blowing of a blast furnace after its durable stopping for more than 80 days without tapping of freezing iron]. *Chernye Metally [Ferrous metals]*, 2017, 11, 28–36. (In Russian).
 17. Semenov Yu.S., Shumel'chik E.I. & Gorupakha V.V. (2018). Efficient Management of the Charging of Blast Furnaces and the Application of Contemporary Means of Control Over the Variable Technological Conditions. *Metallurgist*, 2018, Vol. 61, 11–12, 950–958. <https://doi.org/10.1007/s11015-018-0591-4>

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2019. – Вип.33
 «Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33

ISSN 2522-9117 «Fundamental'nye i prikladnye problemy chernoj metallurgii». – 2019. – Vypusk 33

18. Semenov Yu.S., Shumel'chik E.I. & Gorupakha V.V. (2017). Blast Furnace Shaft Thermal State Monitoring System. *Steel in Translation*, 2017, Vol. 47, 11, 728–731. <https://doi.org/10.3103/S0967091217110092>
19. Semenov Yu.S., Shumel'chik E.I. & Gorupakha V.V. (2018). Expert Module of the Thermal Probe System for Blast Furnace Charging Control. *Steel in Translation*, 2018, Vol. 48, 12, 802–806. <https://doi.org/10.3103/S0967091218120136>
20. Semenov Yu.S. (2018). Ispol'zovaniye informatsii termozondov dlya upravleniya zagruzkoy domennoy pechi [Use of thermal probes information for controlling the blast furnace charging]. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost' [Metallurgical and mining industry]*, 2018, 7, 208–215. (In Russian).
21. Horupakha V.V., Semenov Yu.S., Shumelchik E.I. & Vyshinskaya E.D. (2019). Trends in the Engineering of Blast Furnaces in Modern Fuel and Raw Materials Conditions. *Steel in Translation*, 2019, Vol. 49, 2, 110–117. <https://doi.org/10.3103/S0967091219020086>
22. Horupakha V.V., Semenov Yu.S., Shumelchik E.I. & Vashchenko S.V. (2019). Influence of Transient Blast Furnace Conditions on the Temperature in the Cooling System. *Steel in Translation*, 2019, Vol. 49, 6, 397–401. <https://doi.org/10.3103/S0967091219060056>
23. Semenov Yu.S. (2016). Novyye podkhody v upravlenii zagruzkoy domennoy pechi, oborudovannoy BZU, v sovremennykh usloviyakh raboty [Choice of rational blast furnace charging regimes, CCU equipment, for operating conditions with a slow feed rate and with unstable charge material quality]. *Poznaniye protsessov i razvitiye tekhnologii domennoy plavki: kollektivnyy trud vtorogo mezhdunarodnogo simpoziuma* [Cognition of processes and development of blast-furnace smelting technology: collective work of the second international symposium] I.G. Tovarovskiy (Ed). Dnepr: ZHURFOND, 2016, 272–285. (In Russian).
24. Bol'shakov V.I., Semenov Yu.S. & Shumel'chik E.I. et al. (2014). Osvoyeniye energosberegayushchey tekhnologii zagruzki domennoy pechi, oborudovannoy BZU, v kon'yunkturykh toplivno-syr'yevykh i tekhnologicheskikh usloviyakh [Development of energy-saving charging technology of a blast furnace with a bell-less top in the context of fuel, raw materials, and technological conditions]. *Fundamental'nyye i prikladnyye problemy chernoy metallurgii. Sb.nauchn.tr.ICHM [Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy. Collection of scientific articles ISI NANU]*, 2014, 28, 57–80. (In Russian).
25. Semenov Yu.S., Horupakha V.V., Semion I.Yu., Orobtssev A.Yu. & Shumelchik E.I. (2019). Effektivnost' realizatsii okruzhnoy neravnomernosti raspredeleniya PUT po vozdushnym furmam domennoy pechi [Effectiveness of implementation of the circumferential uneven pulverized coal distribution on the blast furnace air tuyeres]. *Chernye Metally [Ferrous metals]*, 2019, 10, 11–16. (In Russian).
26. Semenov Yu.S., Gorupakha V.V. & Kuznetsov A.M. et al. (2020) Experience of Using Manganese-Containing Materials in Blast-Furnace Charge. *Metallurgist*, 2020, Vol. 63, 9–10, 1013–1023. <https://doi.org/10.1007/s11015-020-00920-1>

Yu.S. Semenov, PhD, Senior Researcher, ORCID 0000-0003-2299-5742

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2019. – Вип.33

«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33

ISSN 2522-9117 «Fundamental'nye i prikladnyye problemy chernoy metallurgii». – 2019. – Vypusk

E.I. Shumelchik, PhD, Senior Researcher, ORCID 0000-0001-5350-6425

V.V. Horupakha, Researcher, ORCID 0000-0003-0531-1871

Iron and Steel Institute named after Z.I. Nekrasov of the NAS of Ukraine

Development and implementation of the new approaches to diagnostics and management of the blast furnace smelting

Summary. For the conditions of transition modes of blast furnace to ensure its stability in changing the qualitative and quantitative composition of the components of the charge materials, as well as in the change of fuel additives in the blast, the complex use of information of modern means of automated control is proved: stationary thermosets and thermocouples to the lining. New approaches to the choice of rational charging programs using the principle of variable maximum ore loading along the radius of the furnace within the charging cycle for working conditions on a charge of low quality have been developed. The implementation of such a charging program over the next three years has allowed to ensure a stable and economical course of melting, and its adaptation to the technology of using pulverized coal has allowed to reduce the gas flow temperature of the peripheral zone throughout the height of the blast furnace, as well as to preserve the cooling system during the development of lining-free. Expert module of adjustment of the program of charging using the established rational ranges of change of temperature indices of gas flow distribution along the radius of the furnace under different technological conditions of blast furnace has been developed and implemented on three blast furnaces. The method of reasonable choice of location of closed air tuyeres or air tuyeres of different diameter was developed and tested using information on change of lining temperatures on height and circumference of blast furnace. The method of equalizing the raceway adiabatic flame temperature around the blast furnace circumference by creating a non-uniform flow rate of pulverized coal in the air tuyeres has been improved and implemented. The basic technological requirements for blast furnace blasting after its long stop without release of "gantry" cast iron and scraping of materials from the furnace, the use of which before and in the blast furnace blasting of the Yenakieve Iron & Steel Works and the Dneprovsky Iron & Steel Integrated Works after a long-lasting set-up were developed economic indicators, while ensuring the preservation of refractory lining, structures and equipment.

Keywords: blast furnace, charging program, BLT, temperature probe, the quality of coke, pellet content in the charge, lining, blowing of a blast furnace.

For citation: *Semenov YU.S., Shumel'chyk YE.I., Horupakha V.V. Rozrobka i vprovadzhennya novykh pidkhodiv do diahnostyky ta upravlinnya domennoyu plavkoyu. [Development and implementation of new approaches to the diagnosis and management of blast furnace smelting.]. «Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii».[Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy] 2020, 34. 61-77. (In Ukrainian). DOI 10.52150/2522-9117-2019-33-61-77*

Статья поступила в редакцию сборника 7.10.2019 года, прошла внутреннее и внешнее рецензирование (Протокол заседания редакционной коллегии сборника №2 от 23 декабря 2019 года)

*«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2019. - Вип.33
«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33
ISSN 2522-9117 «Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii». – 2019. – Vypusk*

С.А. Шевченко, к.т.н., с.н.с., 0000-0002-9287-9177

А.Ф. Шевченко, д.т.н., проф., вед.научн.сотр., ORCID 0000-0003-0867-6825
Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины

А.П. Толстопят, *Днепропетровский национальный университет*

Л.А. Флеер, *Днепропетровский национальный университет*

В.И. Елисеев, *Днепропетровский национальный университет*

ИССЛЕДОВАНИЕ СКОРОСТИ ДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УГЛАХ ДЕЛЕНИЯ ДВУХФАЗНОГО ПОТОКА

Аннотация. Целью данной работы является оценка влияния т-образного делителя ($\alpha = 180^\circ$) на скорость движения шаровидных частиц по тракту двухсопловой фурмы в потоке воздуха и сопоставление с результатами экспериментов разделения потока при меньших углах. Выполненные исследования показали, что в Т-образном делителе частицы реагента имеют сложную траекторию движения. Часть частиц имеет скорость истечения соответствующую другим типам делителя (7 – 14 м/с), а другая равновесная часть частиц тормозится и имеет скорость истечения в 4 – 5 раз меньшую (1 – 3 м/с), что отражено бимодальным характером распределения полученных результатов. В связи с этим, переход от одиночных частиц к более плотному потоку (в случае повышения интенсивности подачи реагента) приведет к появлению нестабильности процесса инжекции, к пульсациям и даже закупориванию фурмы, что в условиях истечения в расплав приведет к закупорке сопла. Подтверждением этому являются отдельные попытки вдувать гранулированный магний через т-образную фурму на установках десульфурации чугуна, когда ввод магния осуществлялся с завышенными расходами транспортирующего газа и интенсивностью не более 5 – 6 кг/мин, что в 5 раз меньше чем через у-образную двухсопловую фурму. При этом инжекция осуществлялась через одно сопло, поскольку другое на первых секундах выдачи магния закупоривалось. Процесс протекал бурно и сопровождался выплесками чугуна из ковша. Установлено, что в сравнении с углами разделения потока ($\alpha = 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$) т-образный делитель ($\alpha = 180^\circ$) в большей степени снижает скорость частиц магния и полистирола (на 20 – 50%). Кроме того, на скорость движения твердой частицы по тракту двухсопловой фурмы оказывают существенное влияние физические характеристики взаимодействующих материалов, форма частиц, расход транспортирующего газа и длина патрубка после делителя.

Ключевые слова: десульфурация чугуна, магний, инжекция, фурма, делитель потока

Ссылка для цитирования: Шевченко С.А., Шевченко А.Ф., Толстопят А.П., Флеер Л.А., Елисеев В.И. Исследование скорости дисперсных частиц при различных углах деления двухфазного потока. //«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2019. - Вып.33. – С.78-86. (In Russian). DOI 10.52150/2522-9117-2019-33-78-86

Состояние проблемы. Создавая современные системы инжекционного рафинирования расплава в ковшах дисперсными

реагентами, разработчики стремятся повысить эффективность процесса за счет увеличения реакционной зоны и рассредоточения ее в объеме рафинируемой ванны. Наиболее рациональным путем в этом случае является применение фурм с двумя или более соплами, в тракте которых основной двухфазный поток (транспортирующий газ + дисперсный реагент) разделяется на два или более потоков.

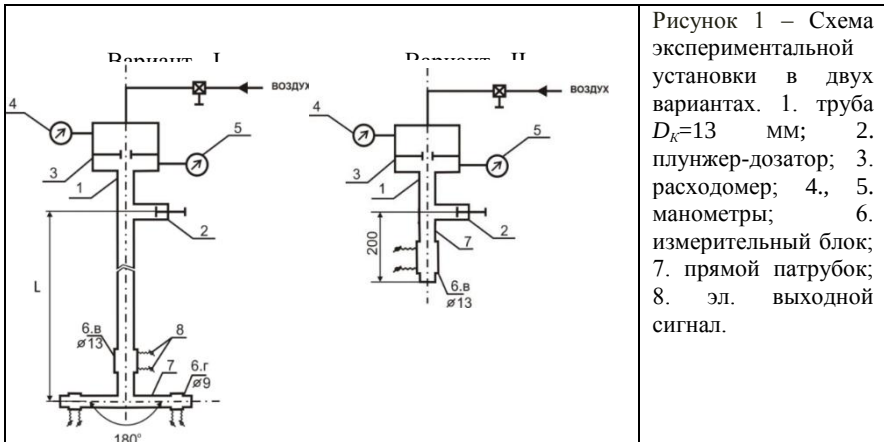
Переход от одного сопла к нескольким, привел к появлению проблем, связанных со стабильностью инжектирования, закупориванием сопел, равномерностью разделения потока, удобством изготовления и обслуживания фурм, что во многом определяется особенностью конструкции делителя потока, встроенного в пневмотранспортную систему фурменного устройства.

Ранее нами были проведены исследования [1, 2] влияния особенности конструкции делителя на скорость движения двухфазного потока на примере шарообразных твердых частиц $\varnothing 1,5$ мм (магния и полистирола). Были рассмотрены углы разделения потока $\alpha = 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$. Результаты этих исследований показали, что наличие делителя в тракте фурмы вносит помехи при движении частиц, снижая их скорость на момент разделения до 32 – 34%. При этом, изменение геометрии конструкции делителя: угла разделения (в пределах $\alpha = 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$), типа используемых отводов (прямой или изогнутый) существенного влияния на скорость частиц не оказывало. Эти выводы указывают на целесообразность рассмотрения крайнего варианта, разделения потока с углом $\alpha = 180^\circ$, т.е. вариант т-образного делителя. Имеющиеся сведения о применении фурм с т-образным делителем потока для инжектирования в расплав дисперсных материалов: порошкообразной извести, смеси извести и магния [4] отмечают простоту изготовления и удобство обслуживания таких фурм.

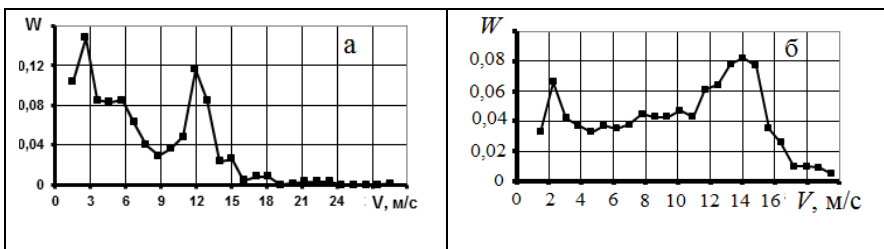
Цель исследования. С помощью имеющейся методики и экспериментальной установки [1,3] оценить влияние т-образного делителя ($\alpha = 180^\circ$) на скорость движения шаровидных частиц по тракту двухсопловой фурмы в потоке воздуха и сопоставить с результатами экспериментов разделения потока при меньших углах.

Описание эксперимента. Эксперименты проводились в лаборатории Днепропетровского национального университета на разработанном стенде [1]. На масштабную модель тракта двухсопловой фурмы с т-образным делителем (рис. 1) были установлены специальные оптоэлектронные блоки [1], позволяющие регистрировать скорость частиц двухфазного потока без вмешательства в его структуру в канале фурменного устройства до и после деления. Делителю потока предшествовал вертикальный канал $L = 2000$ мм (при дополнительном эксперименте $L = 100$ мм). Поток разделялся на два отвода к соплам длиной $L \approx 150$ мм. Сумма площадей поперечных сечений отводов делителя равна площади поперечного сечения вертикального канала (трубы $d = 13$ мм) перед ним. Все элементы тракта выполнены из стали. Расход транспортирующего

воздуха рассчитывался по перепаду давления на расходной шайбе и соответствовал расходам ранее проведенных экспериментов [1]: $Q = 17 \text{ нм}^3/\text{ч}$ (1,0 ати); $21 \text{ нм}^3/\text{ч}$ (1,5 ати); $25 \text{ нм}^3/\text{ч}$ (2,0 ати); $30 \text{ нм}^3/\text{ч}$ (2,65 ати), что для диаметра основного канала (13 мм) соответствовало скоростям газа $u_z = 17 \text{ м/с}$, $u_z = 45 \text{ м/с}$, $u_z = 54 \text{ м/с}$ и $u_z = 65 \text{ м/с}$. В качестве дисперсного материала использовались полистирол шаровидной формы $d = 1,5 \text{ мм}$ (плотностью 1040 кг/м^3) и окатанный, близкий к шаровидной формы магний $d = 1,2 \text{ мм}$ (плотностью 1740 кг/м^3).



Анализ результатов. Сравнение скоростей дисперсных частиц до и после делителя позволяло определить потерю скорости при его прохождении, в зависимости от угла между осями сопел [2]. На рис. 2 приведены результаты измерения скоростей частиц оптоэлектронным блоком расположенным после т-делителя.



Показано, что распределения вероятных скоростей ($V, \text{ м/с}$), в отличие от ранее полученных результатов, не подчиняются нормальному закону, а являются бимодальными с ярко выраженными двумя (практически

равновероятными) максимумами. Следует отметить, что величины наиболее вероятных скоростей частиц как первого максимума $V_w = 1 - 2$ м/с для полистирола и $V_w = 2 - 3$ м/с для магния, так и второго $V_w = 7,5 - 14$ м/с для полистирола и $V_w = 6,6 - 12,4$ м/с для магния, растут (в исследованном диапазоне) пропорционально увеличению расхода транспортирующего газа.

Для прояснения физической основы бимодального распределения было проведено несколько дополнительных экспериментов. На рис. 3 приведены результаты измерений после делителя при $L = 100$ мм, т.е. при укороченном в 20 раз разгонном участке. Сравнение их с результатами, приведенными на рис. 2 (полистирол, $L = 2000$ мм) показывает, что характер распределения другой – и имеет место нормальное распределение. Значение наиболее вероятной скорости V на выходе из т-делителя при соответствующих расходах газа меняется слабо, но доля W наиболее вероятных скоростей в распределении увеличивается втрое. При тех же условиях магний (рис.3, б) сохраняет бимодальное распределение.

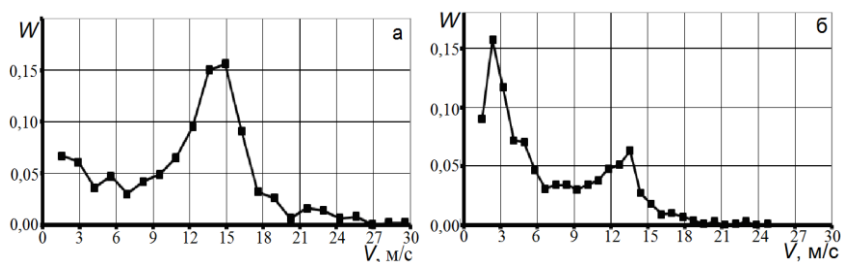


Рисунок 3 – Распределение скоростей частиц на выходе т- делителя: $Q_2 = 30$ м³/ч, $U = 65$ м/с, $L = 100$ мм

С целью полностью исключить предварительный разгон частиц в вертикальном участке т-делителя стенд был собран без т-делителя в одной горизонтальной плоскости и включал лишь питатель и оптоэлектронный блок (100 мм). Результаты этих продувок представлены на рис. 4. Видно, что в этом случае величины V_w как для полистирола, так и для магния при соответствующих расходах газа достаточно близки и имеют близкий к «нормальному» закон распределения.

Следует отметить, что значения наиболее вероятной скорости V_w (в случае бимодального распределения – второй максимум) на выходе из т-насадки как для короткого и длинного вертикальных разгонных участков, так и для случая короткого горизонтального разгонного участка, без т-делителя при соответствии расходов газа достаточно близки.

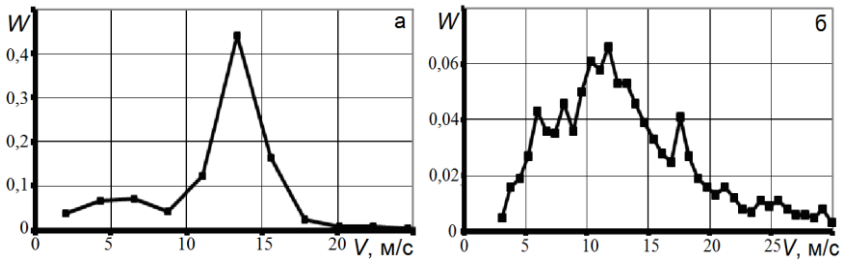


Рисунок 4 – Распределение скоростей частиц, горизонтальная труба $D = 13$ мм, ($L=100$ мм) без делителя. $Q_2 = 30$ нм³/ч, $U = 65$ м/с, а) Полистирол; б) Магний.

Также, следует отметить тот факт, когда при экспериментах с длинным основным каналом ($L = 2000$ мм) некоторые частицы после упругого отражения от горизонтальной плоскости т-делителя поднимались против потока по вертикальному каналу на высоту более 100 мм и регистрировались первым оптоэлектронным блоком (на входе в т-делитель). Дополнительные эксперименты с прикрепленным к корпусу т-делителя микрофоном подтверждают, что некоторые частицы после лобового отражения более 4-х раз ударяются о стенки тракта, тем самым, теряя свою скорость. Частицы неправильной формы имеют всего один отскок.

Результаты исследований позволили установить, что движение частиц, принадлежащих к различным модам, происходит по различным траекториям. Ко второй моде, с большими из наиболее вероятных скоростей, относятся частицы, которые потеряли свою скорость в результате лобового столкновения до весьма малых значений, и уже в горизонтальном участке т-делителя беспрепятственно разгонялись. Моду с меньшими вероятными скоростями составляют частицы, которые в силу различных причин на момент вхождения в горизонтальный канал сохранили свою скорость после отражения от горизонтальной плоскости т-делителя. Движение этих частиц под углом к оси горизонтального канала способствует их частому контакту со стенкой (например: многократное отражение или спиральное движение частицы). В этом случае, наличие начальной скорости, на момент вхождения частицы в горизонтальный участок т-делителя, отрицательно влияет на последующий ее разгон.

На рис. 5 показана зависимость наиболее вероятных скоростей частиц от расхода газа для полистирола (а) и магния (б). Видно, что мода наиболее вероятных больших скоростей (белый маркер) линейно нарастает с увеличением расхода газа, что вполне отвечает физической картине прямолинейного движения частицы в потоке газа. В то же время мода меньших скоростей (черный маркер) практически не зависит от

расхода газа, что, по всей вероятности, подтверждает предположение о рикошете, скольжении и движении частиц по винтовой линии.

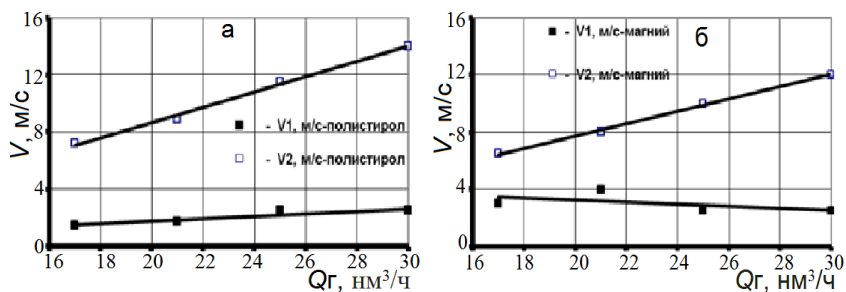


Рисунок 5 – Зависимость наиболее вероятных скоростей частиц на выходе т-образной фурмы от расхода газа. а) полистирол; б) магний; (■) V1 – наиболее вероятные меньшие скорости; □ V2 – наиболее вероятные большие скорости).

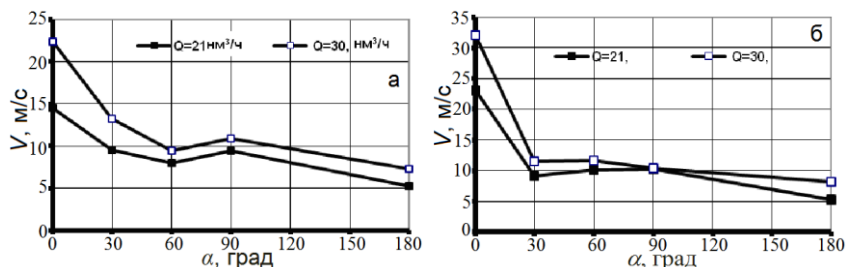


Рисунок 6 – Зависимость наиболее вероятных больших скоростей частиц от угла между осями сопел делителя фурменного устройства: а) полистирол; б) магний.

Ввиду бимодального характера распределения результатов полученных на т-образном делителе (практически с двумя равнозначными максимумами), сравнение их с результатами других типов делителей $\alpha = 30 - 90^\circ$ [2] является не корректным. Поэтому результаты по т-делителю представлено в виде средних значений. На рис. 6 представлено сравнение наиболее вероятных скоростей частиц полистирола (а) и магния (б) для различных углов между осями сопел делителя фурменного устройства ($\alpha = 0^\circ$ отвечает фурме без делителя, $\alpha = 180^\circ$ – фурме с т-делителем). Кривые показывают, что скорости частиц, как магния, так и полистирола на срезе сопел фурменного устройства для делителей $\alpha = 30 - 90^\circ$ практически не зависят от угла между осями патрубков, т.е. даже при самых малых углах разворота потока в делителе значения скоростей определяются длиной патрубка делителя разгонного участка и расходом несущего газа. При т-образном делителе в целом скорость частиц снижается на 20 – 50 % относительно других типов делителей.

Выводы. Настоящие исследования показали, что в т-образном делителе частицы реагента имеют сложную траекторию движения. Часть частиц имеет скорость истечения, соответствующую другим типам делителя (7 – 14 м/с), а другая равновесная часть частиц тормозится и

имеет скорость истечения в 4 – 5 раз меньшую (1 – 3 м/с), что отражено бимодальным характером распределения полученных результатов. В связи с этим, переход от одиночных частиц к более плотному потоку (в случае повышения интенсивности подачи реагента) приведет к появлению неустойчивости процесса инъекции, к пульсациям и даже заклиниванию фурмы, что в условиях истечения в расплав приведет к закупорке сопла.

Подтверждением этому является опыт североамериканских металлургов [4] и отдельные попытки вдвухать гранулированный магний через т-образную фурму на установках десульфурации чугуна (КНР). Когда ввод магния осуществлялся с завышенными расходами транспортирующего газа и интенсивностью не более 5 – 6 кг/мин, что в 5 раз меньше чем через у-образную двухсопловую фурму. При этом инъекция осуществлялась через одно сопло, поскольку другое на первых секундах выдачи магния закупоривалось. Процесс протекал бурно и сопровождался выплесками чугуна из ковша.

Таким образом, можно сделать заключение, что двухсопловые фурмы с Т-образны типом делителя для инъекции дисперсных материалов в различного рода расплавы применять не рационально.

Библиографический список

1. Толстомят А.П. Экспериментальное определение скорости частиц в канале постоянного диаметра / А.П. Толстомят, Л.А. Флер, В.Е. Давидсон, В.И. Елисеев, Т.А. Рузова, А.Ф. Шевченко, И.А. Маначин, С.А. Шевченко // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. Сборник научных трудов.* – 2011. – Вып. 23. – С. 113-122.
2. Толстомят А.П. Экспериментальное определение скорости частиц двухфазного потока (газ-тв.) в трубопроводе с делителем. / А.П. Толстомят, В.В. Давидсон, Л.А. Флер, В.И. Елисеев, Т.А. Рузова, И.А. Маначин, А.Ф. Шевченко, С.А. Шевченко // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. Сборник научных трудов.* 2012. – Вып. 25. – С. 123-130.
3. Рузова Т.А., Толстомят А.П., Флер Л.А. Метод экспериментального определения скоростей частиц в двухфазном потоке // *Науковий вісник Національного гірничого університету.* – Дніпропетровськ. – 2012. – № 3. – С.107–113.
4. VI *Международный симпозиум по десульфурации чугуна и стали: Сб. докладов* / Магдебург – Германия. 14–16 сентября 2000 г. – 138 с.

References

1. Tolstopyat A.P., Fleer L.A., Davidson V.E., Eliseev V.I., Ruzova T.A. & Shevchenko A.F. et al. (2011). Eksperimentalnoye opredelenie skorosti chastits v kanale postoyannogo diametra [Experimental determination of the particle velocity in a channel of constant diameter]. *Fundamental'nyye i prikladnyye problemy chernoy metallurgii. Sbornik nauchnykh trudov* [Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy. Collection of scientific papers]. Dnepropetrovsk, 2011, 23, 113–122. (In Russian).
2. Tolstopyat A.P., Davidson V.E., Fleer L.A., Eliseev V.I., Ruzova T.A. & Manachin I.A. et al. (2012). Eksperimentalnoye opredelenie skorosti chastits

- dvuhfaznogo potoka (gaz-tv.) v truboprovode s delitelem [Experimental determination of the particle velocity of a two-phase flow (gas-solid) in a pipeline with a divider]. *Fundamental'nyye i prikladnyye problemy chernoy metallurgii. Sbornik nauchnykh trudov* [Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy. Collection of scientific papers]. Dnepropetrovsk, 2012, 25, 123–130. (In Russian).
3. Ruzova T.A., Tolstopyat A.P. & Fleer L.A. (2012). Metod eksperimentalnogo opredeleniya skorostey chastits v dvuhfaznom potoke [Method of experimental determination of particle velocities in a two-phase flow]. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu* [Science Bulletin of the National Mining University]. Dnepropetrovsk, 2012, 3, 107–113. (In Russian).
 4. VI Mizhnarodniy simpozium po desulfuratsii chuguna i stali: Sb. Dokladov. [VI International Symposium on desulfurization of iron and steel: Collection of reports]. (2000). Germany, Magdeburg (14-16 sentyabrya 2000 g), 138 p.

С.О. Шевченко, к.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0002-9287-9177

А.Ф. Шевченко, д.т.н., проф., пров.наук.співр., ORCID 0000-0003-0867-6825

Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України

А.П. Толстоп'ят, Дніпропетровський національний університет

Л.А. Флеер, Дніпропетровський національний університет

В.І. Єлисеєв Дніпропетровський національний університет

Дослідження швидкості дисперсних частинок при різних кутах ділення двофазного потоку

Анотація. Метою даної роботи є оцінка впливу т-образного подільника ($\alpha = 180^\circ$) на швидкість руху кулястих частинок по тракту соплової фурми в потоці повітря і зіставлення з результатами експериментів поділу потоку при менших кутах. Виконані дослідження показали, що в т-образному подільнику частки реагенту мають складну траєкторію руху. Частина частинок має швидкість витікання відповідну іншим типам подільника (7 – 14 м/с), а інша рівноважна частина частинок гальмується і має швидкість витікання в 4 – 5 разів меншу (1 – 3 м/с), що відображено бімодальним характером розподілу отриманих результатів. У зв'язку з цим, перехід від одиночних частинок до більш щільному потоку (у разі підвищення інтенсивності подачі реагенту) призведе до появи нестабільності процесу інжекції, до пульсацій і навіть замикання фурми, що в умовах витoku в розплаві призведе до закупорки сопла. Підтвердженням цьому є окремі спроби вдувати гранульований магній через т-образну фурму на установках десульфурації чавуну, коли завершення введення магнію здійснювалось із завищеними витратами газу, який транспортує магній, і інтенсивністю не більше 5 – 6 кг/хв, що в 5 разів менше ніж через у-образну соплову фурму. При цьому інжекція здійснювалася через одне сопло, оскільки інше на перших секундах видачі магнію закупорюють. Процес протікав бурхливо і супроводжувався виплесками чавуну з ковша. Встановлено, що в порівнянні з кутами поділу потоку ($\alpha = 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$) т-образний дільник ($\alpha = 180^\circ$) більшою мірою знижує швидкість частинок магнію і полістиролу (на 20 – 50%). Крім того, на швидкість руху твердої частинки по тракту соплової фурми істотно впливають фізичні характеристики взаємодіючих матеріалів, форма частинок, витрата газу, транспортує, і довжина патрубка після дільника.

Ключові слова: інжекція, канал фурми, дільник потоку, частинка магнію, експериментальна установка, розподіл ймовірності швидкості.

S.A. Shevchenko, Ph.D., Senior Researcher, ORCID 0000-0002-9287-9177

A.F. Shevchenko, Dr. Sci., Professor, Leading Research Scientist, ORCID 0000-0003-0867-6825

Iron and Steel Institute named after Z.I. Nekrasov of the NAS of Ukraine

A.P. Tolstopyat, Dnipropetrovsk National University

L.A. Fleyer, Dnipropetrovsk National University

V.I. Yeliseyev, Dnipropetrovsk National University

The study of the velocity of dispersed particles at different angles of division of a two-phase flow

Summary. The aim of this work is to assess the influence of a *t*-shaped divider ($\alpha = 180^\circ$) on the speed of movement of spherical particles along the path of a two-nozzle lance in the air stream. Also, comparison with the results of flow separation experiments at smaller angles. The performed studies showed that in the *t*-shaped divider the reagent particles have a complex trajectory of motion. Part of the particles has an outflow velocity corresponding to other types of divider (7 – 14 m/sec), and the other equilibrium part of the particles is slowed down and has an outflow speed 4 – 5 times lower (1 – 3 m/sec). This is reflected by the bimodal nature of the distribution of the results. In this regard, the transition from single particles to a denser flow (in the case of an increase in the reagent supply intensity) will lead to instability of the injection process, to pulsations and even blocking of the lance. This under conditions of flow into the melt will lead to blockage of the nozzle. This is confirmed by individual attempts to inject granular magnesium through a *t*-shaped lance in cast iron desulfurization plants. In this case, magnesium was introduced with overestimated flow rates of the transporting gas and an intensity of no more than 5–6 kg/min, which is 5 times less than through a *y*-shaped two-nozzle lance. In addition, the injection was carried out through one nozzle, since the other in the first seconds of the release of magnesium was clogged. The process proceeded violently and was accompanied by splashes of cast iron from the ladle. It is established that, in comparison with the flow separation angles ($\alpha = 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$), the *t*-shaped divider ($\alpha = 180^\circ$) reduces the speed of magnesium and polystyrene particles to a greater extent (by 20 – 50%). In addition, the physical characteristics of the interacting materials, the shape of the particles, the flow rate of the transporting gas, and the length of the nozzle after the divider significantly affect the speed of movement of a solid particle along the path of a two-nozzle lance.

Keywords: iron desulfurization, magnesium, injection, tuyere, flow divider

For citation: Shevchenko S.A., Shevchenko A.F., Tolstopyat A.P., Fleyer L.A., Yeliseyev V.I. Issledovaniye skorosti dispersnykh chastits pri razlichnykh uglakh deleniya dvukhfaznogo potoka. [The study of the velocity of dispersed particles at different angles of division of a two-phase flow]. *«Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii»*. [Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy], 2019, 33. 78-86. (In Russian). DOI 10.52150/2522-9117-2019-33-78-86

Статья поступила в редакцию сборника 17.09.2019 года, прошла внутреннее и внешнее рецензирование (Протокол заседания редакционной коллегии сборника №2 от 23 декабря 2019 года)

А.Ф. Шевченко, д.т.н., проф., вед.научн.сотр., ORCID 0000-0003-0867-6825

В.Г. Кисляков, к.т.н., с.н.с., зав. отделом, ORSID 0000-0002-1775-5050

Б.В. Двоскин, к.т.н., с.н.с., ORSID 0000-0003-2891-7833

А.С. Вергун, д.т.н., с.н.с., ORSID 0000-0001-5493-9214

И.А. Маначин, к.т.н., с.н.с., ORSID 0000-0001-9795-6751

В.П. Петруша, вед.инж.,

С.А. Шевченко, к.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0002-9287-9177

Институт черной металлургии им. З.И.Некрасова НАН Украины

ЭТАПЫ НАУЧНО-ПРИКЛАДНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ОТДЕЛА ВНЕПЕЧНОЙ ОБРАБОТКИ ЧУГУНА ИЧМ НАНУ

Аннотация. Представлена история создания и развития научно-исследовательского подразделения Института черной металлургии, отдела внепечной обработки чугуна. С 1939 по 1983 г.г. это структурное подразделение ИЧМ возглавляла д.т.н., профессор Наталья Александровна Воронова, затем в течение 34 лет, до 2017 г. руководителем отдела был ученик и соратник Н.А. Вороновой – д.т.н., профессор Шевченко А.Ф., с 2017 г. по настоящее время отделом руководит к.т.н. Кисляков В.Г. За данный период комплекс научных исследований и разработок обеспечил возможность сотрудникам отдела защитить 3 докторских и 16 кандидатских диссертаций. Двум сотрудникам отдела было присвоено ученое звание профессора, а десятерым – старшего научного сотрудника. Показана эволюция технологического процесса и оборудования обработки чугуна зернистым магнием в ковшах различной емкости. В частности, инжектировать в расплав гранулированный магний без добавок фурмами, используемыми для вдувания смесей магния с наполнителями, не представилось возможным из-за закупорки канала магниепровода на выходе из фурмы. Для решения этой проблемы была разработана фурма новой конструкции, на выходе канала которой была установлена испарительная камера, задачей которой являлось отдалить срез канала фурмы от непосредственного контакта с чугуном. Конструкция фурм с испарительными камерами позволила практически исключить закупорки канала фурм. Выполненные исследования взаимодействия магния с жидким чугуном явились научной базой для создания современного высокоавтоматизированного процесса внепечного рафинирования чугуна моноинжекцией магния без добавок. Наиболее успешное применение этой технология получила при создании модернизируемых комплексов на предприятиях Китая. Начиная с 2001 года, на 39 заводах КНР сооружено и введено в эксплуатацию 84 комплекса внепечной десульфурации чугуна и скачивания шлака по технологии ИЧМ с суммарной мощностью более 100 млн. т/год низкосернистого и очищенного от шлака чугуна.

Ключевые слова: внепечная десульфурация чугуна, эволюция, гранулированный магний, фурмы, испарительная камера, история

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2019. – Вип.33

«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33

ISSN 2522-9117 *«Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii». – 2019. – Vypusk 33*

Ссылка для цитирования: Шевченко А.Ф., Кисляков В.Г., Двоскин Б.В., Вергун А.С., Маначин И.А., Петруша В.П., Шевченко С.А. Этапы научно-прикладной деятельности отдела внепечной обработки чугуна ИЧМ НАН Украины. //«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2019. - Вип.33. – С.87-97. (In Russian). DOI 10.52150/2522-9117-2019-33-87-97

В 1939 году в составе АН УССР было организовано новое структурное подразделение – Институт черной металлургии (ИЧМ). Одним из научных подразделений ИЧМ стала лаборатория высококачественного чугуна. К перспективному научному направлению работы этой лаборатории были отнесены исследования по внеагрегатной обработке расплава кислородом с целью получения низкоуглеродистого чугуна, выполняемые «кислородной» группой. В 1953 г. эта группа была ориентирована на литейное производство и реформирована в литейную группу, которая в 1960 г. была расширена до отдела технологии металлургического литья (ОТМЛ), а в 1975 г., в связи с изменением направленности научных разработок, ОТМЛ был преобразован в отдел внепечной обработки чугуна (ОВОЧ).

С 1939 по 1983 г.г. эти структурные подразделения ИЧМ возглавляла д.т.н., профессор Наталья Александровна Воронова (рис. 1.), затем в течение 34 лет, до 2017 г. руководителем ОВОЧ был ученик и соратник Н.А. Вороновой – д.т.н., профессор Шевченко А.Ф., с 2017 г. по настоящее время отделом руководит к.т.н. Кисляков В.Г.



Рисунок 1 – Основатель отдела внепечной обработки чугуна д.т.н., профессор Наталья Александровна Воронова.

Высокий профессионализм и широкая эрудиция Вороновой Н.А. позволили создать научную школу по внепечной обработке чугуна, характеризующуюся широким спектром направлений исследований и высоким научным уровнем выполняемых разработок.

На протяжении всего периода творческой деятельности отдел располагал активным профессиональным ядром, обеспечившим не только мировой уровень ряда выполненных технологических разработок, но и эффективность их внедрения на отечественных и зарубежных металлургических предприятиях. Выполненный комплекс пионерских научных исследований и разработок обеспечил возможность сотрудникам

отдела защитить 3 докторских и 16 кандидатских диссертаций. Двум сотрудникам отдела было присвоено ученое звание профессора, а десятерым – старшего научного сотрудника.

На этапе выполнения комплекса работ по повышению качества и срока службы изделий из чугуна для машиностроения и металлургии был выполнен ряд эффективных разработок, в т.ч.:

было установлено, что низкоуглеродистый чугун, полученный продувкой кислородом в копильниках вагранок или в отдельных ёмкостях (типа конвертера), позволяет вдвое повысить стойкость отлитых из него металлоизделий;

разработанные технология и оборудование для отливки помольных шаров из продутого кислородом доменного чугуна позволили получить чугунные шары, стойкость которых была в 1,5-2,0 раза выше, чем стойкость стальных шаров;

применение созданной технологии и оборудования для отливки мелющих тел из модифицированного цериевыми сплавами чугуна, позволили добиться рекордной на тот период стойкости различных мелющих тел;

отработанная технология модифицирования чугуна слитковым ферроцерием в доменных чугуновозных ковшах для металлургических изложниц обеспечила существенный рост прочностных характеристик материала изложниц, обусловленный улучшением структуры модифицированного металла, что позволило вдвое снизить расходные коэффициенты этого оборудования для разливки сталей широкого сортамента;

разработанный процесс модифицирования чугуна в барабанных ковшах вдуванием порошкового магния в смеси с графитом для отливки изложниц позволил добиться стабильности получения чугуна с шаровидным графитом, а также повысить экономичность процесса модифицирования;

применение магниевых модификаторов при отливке хромоникелевых прокатных валков для горячей прокатки существенно улучшило их свойства и стойкость.

Несмотря на то, что отдел имел хорошие научные достижения в области повышения качества чугуна и литых изделий, к середине 60-х годов прошлого столетия по инициативе проф. Н.А. Вороновой усилия отдела были сконцентрированы в направлении внепечной десульфурации больших масс доменного чугуна для обеспечения требований сталеплавильного производства и для получения литейного рафинированного чугуна.

Такое решение базировалось, с одной стороны, на научном предвидении в перспективе потребности сталеплавильного передела в

перedefьном рафинированном чугуна с минимальным количеством вредных примесей (в первую очередь серы) для производства высококачественных сталей. С другой стороны, результаты значительного объема исследований по внепечной обработке доменного и ваграночного чугунов различными реагентами (известью, карбидом кальция, содой, ферроцериом, магнийсодержащими смесями и зернистым магнием), позволили сделать заключение, что ковшовая десульфурация чугуна является перспективным направлением для создания ресурсосберегающих и энергоэффективных технологий производства качественных железоуглеродистых расплавов.

Проведенные фундаментальные исследования, с использованием традиционных немагневых реагентов, направленные на уточнение механизмов взаимодействия реагентов с расплавом чугуна и определение факторов, влияющие на эффективность процесса десульфурации, позволили наметить пути дальнейшего совершенствования этих процессов.

Было установлено, что при использовании кальцийсодержащих реагентов эффективность процесса в значительной мере зависит не только от длительности контакта частиц реагента с серой чугуна, развитой площади поверхности реагента, раскисленности обрабатываемого расплава, а также определяется активностью процессов массопереноса в прифурменной зоне. Проведенные исследования показали, что рационализации процессов массопереноса в прифурменной зоне способствует инжектирование реагентов в расплав с концентрацией реагента в газоносителе на уровне 50 – 60 кг/м³. Кроме того, активизации процессов массопереноса в прифурменной зоне способствует организация в этой зоне микровзрывов за счет ввода в реагент диссоциирующих добавок, например, известняка или соды, а также использование в качестве газа-носителя природного газа, диссоциирующего в жидком чугуне.

Дальнейшему повышению эффективности процесса десульфурации чугуна известью способствовал ввод в состав реагента более сильных восстановителей (Al и Mg), чем имеющиеся в чугуне (Si, C). Полученные экспериментальные данные показали, что использование в качестве добавок к извести алюминия, магния и соды в количестве 10 – 20% обеспечивает повышение эффективности десульфурации на 15 – 20%. Причем совместное использование добавки соды и природного газа в качестве газа-носителя обеспечивало повышение эффективности десульфурации до 30%.

Проведенные исследования по применению карбида кальция для десульфурации чугуна показали, что этот реагент является неплохим десульфуратором, но его использование сопряжено с серьезными

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2019. – Вип.33

«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33

ISSN 2522-9117 *«Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii». – 2019. – Vypusk 33*

проблемами. Карбид кальция является источником образования взрывоопасного газа – ацетилена, что требует специальных мер для его хранения и исполнения оборудования во взрывобезопасном исполнении. Кроме того, образующиеся после десульфурации карбидные шлаки требуют сложной утилизации из-за выделения в атмосферу ацетилена, образующего с кислородом воздуха взрывоопасную смесь.

Результаты проведенного комплекса исследований с использованием усовершенствованных технологий десульфурации чугуна немагниевыми реагентами, дают основание считать, что немагниевого реагенты в ряде случаев могут служить конкурентами магнию.

На основании обобщения результатов, выполненных отделом к концу 60-х годов прошлого столетия значительного объема исследований с использованием различных десульфурующих реагентов, было установлено, что наиболее перспективным реагентом для внепечной десульфурации чугуна является магний.

Теоретические исследования научных основ применения магниевых реагентов показали, что магний обладает уникальной способностью в значительных количествах растворяться в чугуне и обеспечивает благоприятные термодинамические и кинетические возможности для десульфурации чугуна. Однако, ввод его в расплав усложнялся из-за низкой температуры испарения (1117 °C). Существовавшие на тот период способы десульфурации больших масс чугуна кусковыми магниесодержащими реагентами оказались нетехнологичными, малоэффективными и нерациональными.

На первом этапе использования диспергированного магния для десульфурации чугуна была поставлена задача разработать технологический процесс, обеспечивающий регулируемый равномерный ввод в расплав магниевого реагента. Для реализации такой технологии потребовалось разработать пневматический питатель, обеспечивающий регулируемую и дозируемую подачу магниевого реагента. Однако, из-за закупорки канала фурмы ввести вглубь расплава порошковый магний без пассивирующих добавок не представилось возможным. Поэтому на этом этапе вынуждены были остановиться на обработке жидкого чугуна порошковыми смесями магния с известью, с доломитом, или с графитом. Добавки в виде извести и доломита не только усложняли процесс подготовки реагента, но и требовали увеличения затрат на реагент и снижали эффективность процесса. Однако без их использования осуществить надежный ввод реагента в расплав фурмами с прямоточным каналом или с отгибом канала не представлялось возможным из-за закупорки канала фурмы.

Поставленная на следующем этапе исследований задача создания нового процесса внепечной обработки чугуна магнием без добавок требовала решения широкого круга вопросов.

В первую очередь это касается реагента – диспергированного магния.

При разработке магнийсодержащих реагентов было установлено, что порошковый магний, созданный для черной металлургии, нецелесообразно использовать из-за его взрывоопасности и высокой стоимости. Технологическим требованиям, требованиям техники безопасности и по затратности (стоимость на уровне чушкового магния) отвечал созданный Институтом титана по технологическому заданию ИЧМ и при участии сотрудников ОВОЧ гранулированный магний, имевший гранулометрический состав с частицами в пределах 0,5 – 1,6 мм и не содержащий частиц, относящихся к взрывоопасной фракции ($\leq 0,2$ мм). В настоящее время в промышленной практике наряду с гранулированным магнием также широко используется виброфрезерованный (из чушек) магний с защитным покрытием и гранулометрическим составом 0,4 – 1,2 мм.

Инжектировать в расплав гранулированный магний без добавок фурмами, используемыми для вдувания смесей магния с наполнителями (фурмы с отгибом канала с внутренним диаметром 20 – 30 мм), не представилось возможным из-за закупорки канала магниепровода на выходе из фурмы. Гидрогазодинамические исследования работы прифурменной зоны показали, что имеет место заметалливание среза канала чугуном, связанное с недостаточной скоростью движения частиц магния и газового потока, локальным снижением температуры чугуна за счет реализации испарения магния, а также с неравномерностью их истечения из канала фурмы. Для решения этой проблемы была разработана фурма новой конструкции, на выходе канала которой была установлена испарительная камера, задачей которой являлось отдалить срез канала фурмы от непосредственного контакта с чугуном. Конструкция фурм с испарительными камерами позволила практически исключить закупорки канала фурм. Использование фурм с испарительными камерами (внутренний диаметр канала фурмы – 12 мм) в условиях погружения фурм в чугун на глубину до 2,4 м, при расходах газоносителя на уровне 25 – 40 $\text{м}^3/\text{ч}$ и рациональных параметрах работы инъекционных систем обеспечили надежное технологичное вдувание магния в расплав при свободном борте 0,5 – 0,6 м. Технология десульфурации чугуна фурмами с испарительными камерами была внедрена на 5 отечественных промышленных установках десульфурации чугуна, причем на ряде из них реализуется до настоящего времени (более 40 лет).

Фурмы с испарительными камерами, несмотря на необходимость периодического обслуживания испарителей с целью очистки от образующихся на стенках нитридов и карбидов, и ограниченную интенсивность вдувания магния (4 – 8 кг/мин), достаточно широко использовались в промышленной практике до момента, пока глубина погружения фурм в расплав не превышала 2,4 м. При глубине погружения фурм в расплав более 2,4 м резко возросла интенсивность зарастания испарительных камер, что было связано с неполным испарением магния, часть магния оставалась в жидком виде. При этом увеличилась бурность обработки и появились выбросы при подъеме фурмы из чугуна.

Поэтому на следующем этапе исследований была поставлена задача разработать технические решения, обеспечивающие технологичный ввод магния в расплав при десульфурации чугуна в ковшах большой емкости, в которых глубина жидкой ванны более 2,4 м.

Проведенные аналитические газодинамические расчеты по изучению процессов, протекающих в прифурменной зоны фурм без испарительных камер позволили оценить глубину внедрения в расплав частиц реагента различного диаметра при различной скорости их вдувания, уточнить механизм разделения двухфазных потоков при истечении из канала фурмы. Холодное моделирование по изучению диспергирования газопорошковых струй дало возможность определить требуемые параметры инжেকтирования и параметры инжекционного оборудования для вдувания частиц магния в жидкий расплав. В процессе последующих экспериментальных исследований эти параметры уточнялись для различных условий обработки.

Для обеспечения требуемой точности дозирования (погрешность не более 2 %) магния, подаваемого в фурменные устройства, были разработаны автоматизированные модули-дозаторы с механическими питателями.

С целью увеличения интенсивности ввода магния в расплав были сконструированы, опробованы и освоены двухсопловые фурмы.

Опробование различных типов газов-носителей показало, что наиболее эффективными из них являются азот и аргон. Было установлено, что для надежного инжектирования зернистого магния в расплав давление в подводящих трассах должно быть на уровне 0,9 – 1,2 МПа.

В процессе проведения комплекса исследований по изучению влияния на процесс десульфурации ковшевого шлака было установлено, что процессы ресульфурации чугуна блокируются растворенным в чугуне магнием, если его содержание в чугуне, выше его равновесных значений. Показано, что независимо от используемых реагентов и технологий десульфурации чугуна, минимизация прихода серы в конвертерную ванну обеспечивается при условии высокой степени очистки чугуна от шлака.

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2019. – Вип.33

«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33

ISSN 2522-9117 *«Fundamental'nye i prikladnye problemy černoј metallurgii». – 2019. – Vypusk 33*

Для качественного удаления шлака рекомендовано производить корректировку его состава не только с целью повышения сульфидной емкости, но и с целью загущения, обеспечивающего практически полную и достаточно быструю очистку чугуна от ковшевого шлака.

Выполненный комплекс работ по исследованию взаимодействия магния с жидким чугуном и изучению закономерностей процессов, протекающих в системе «металл-реагент-шлак-газовая фаза» явились научной базой для создания современного высокоавтоматизированного процесса внепечного рафинирования чугуна моноинжекцией магния без добавок.

Наиболее успешное применение этот процесс получил при создании модернизируемых комплексов на предприятиях Китая. Начиная с 2001 года, на 39 заводах КНР сооружено и введено в эксплуатацию 84 комплекса внепечной десульфурации чугуна и скачивания шлака по технологии ИЧМ с суммарной мощностью более 100 млн. т/год низкосернистого и очищенного от шлака чугуна (рис. 2).

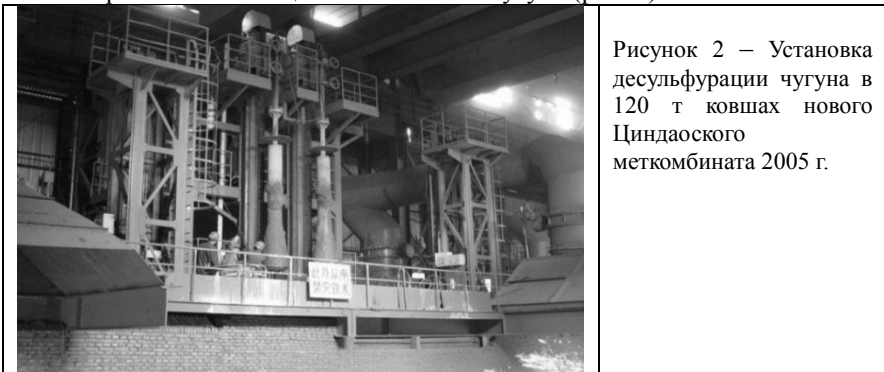


Рисунок 2 – Установка десульфурации чугуна в 120 т ковшах нового Циндаоского меткомбината 2005 г.

Применение указанной технологии и разработанного оборудования для ее реализации в сравнении со всеми другими методами десульфурации, применяемыми в мировой практике, обеспечивает при реализации в ковшах емкостью 35 – 350 т следующие преимущества:

степень десульфурации вплоть до 99 % (достижимое конечное содержание серы, вплоть до 0,0003 %);

попутное рафинирование чугуна от газов (удаление до 50%отн. водорода, до 60 % отн. кислорода, а также до 35 % отн. азота, если в качестве газа-носителя используется аргон);

самая высокая степень усвоения реагента (95 %);

автоматизируемая регулируемость и управляемость процесса;

наибольшая интенсивность ввода магния в расплав (до 25 кг/мин);

самый низкий удельный расход реагентов (в основе 0,3 – 0,6 кг/т);

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2019. – Вип.33

«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33

ISSN 2522-9117 *«Fundamental'nye i prikladnye problemy černoј metallurgii». – 2019. – Vypusk 33*

наименьшее дополнительное шлакообразование (0,6 – 1,0 кг/т);
 наименьшие потери чугуна со шлаком (0,25 – 0,56 кг/т);
 наименьшее снижение температуры чугуна (5 – 10 °С);
 высокая надежность и уровень автоматизации;
 гарантируемая стабильность достигаемых результатов (90-95%);
 наименьший цикл процесса обработки;
 самые низкие

За разработку передовых технических решений работы ОВОЧ неоднократно награждались медалями ВДНХ СССР, Украины и других международных выставок. Разработанный технологический процесс удостоен Госпремии Украины в области науки и техники. В 1998 г ученым ИЧМ был вручен учрежденный Всемирной магниевой ассоциацией международный приз имени проф. Вороновой Н.А.

В настоящее время сотрудники отдела внепечной обработки чугуна совместно с отечественными и зарубежными специалистами развивают работы по внепечной обработке чугуна, расширяя научные исследования в направлении:

изучения тепло-массообменных процессов в системе "чугун - шлак - газовая атмосфера" при внепечной обработке чугуна различными реагентами;

совершенствования инжекционных процессов на основе исследований газогидродинамических и тепло-массообменных процессов;

повышение надежности существующего и создание нового технологического оборудования в составе комплексов внепечной обработки чугуна;

изучение влияния параметров и условий внепечной десульфурации чугуна на процессы прихода серы в конвертер и содержание серы в готовой стали;

оптимизация условий получения особо чистого ($\leq 0,001$ %) по сере чугуна в условиях выплавки низкосернистых марок стали;

изыскание рациональных условий и пределов рафинирования жидкого чугуна с получением низких содержаний серы, кремния, фосфора и азота;

разработка универсальных установок десульфурации чугуна магниевыми, кальциевыми реагентами и смесями на их основе.

Отдел внепечной обработки чугуна Института черной металлургии остается мировым лидером в вопросах внепечной обработки чугуна магниевыми реагентами.

Оценивая научные разработки отдела внепечной обработки чугуна в создании практически нового звена металлургического передела, следует признать, что эти работы оказались не только своевременными, но и в определенной степени опередили требования сталеплавильного производства к качеству чугуна и открыли возможность производить высококачественную конкурентоспособную металлопродукцию при наименьших затратах.

А.П. Шевченко, д.т.н., проф., вед.научн.сотр., ORCID 0000-0003-0867-6825

В.Г. Кисляков, к.т.н., с.н.с., зав. отделом, , ORSID 0000-0002-1775-5050

Б.В. Двоскин, к.т.н., с.н.с., ORSID 0000-0003-2891-7833

О.С. Вергун, д.т.н., с.н.с., ORSID 0000-0001-5493-9214

І.А. Маначин, к.т.н., с.н.с., ORSID 0000-0001-9795-6751

В.П. Петруша, вед.инж.,

С.О. Шевченко, к.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0002-9287-9177

Етапи науково-прикладної діяльності відділу позапічної обробки чавуну ІЧМ НАНУ

Анотація. Представлена історія створення та розвитку науково-дослідного підрозділу Інституту чорної металургії, відділу позапічної обробки чавуну. З 1939 по 1983 р.р. цей структурний підрозділ ІЧМ очолювала д.т.н., професор Наталія Олександрівна Воронова, потім протягом 34 років, до 2017 р керівником відділу був учень і соратник Н.А. Воронової – д.т.н., професор Шевченко А.П., з 2017 року по теперішній час відділом керує к.т.н. Кисляков В.Г. За даний період комплекс наукових досліджень і розробок забезпечив можливість співробітникам відділу захистити 3 докторських і 16 кандидатських дисертацій. Двом співробітникам відділу було присвоєно вчене звання професора, а десятьом – старшого наукового співробітника. Показано еволюцію технологічного процесу і обладнання обробки чавуну зернистим магнієм у ковшах різної ємності. Зокрема, інjektувати до розплаву гранульований магній без добавок фурмами, використовуваними для вдування сумішей магнію з наповнювачами, не виявилось можливим через закупорку каналу магнієпроводу на виході з фурми. Для вирішення цієї проблеми була розроблена фурма нової конструкції, на виході каналу якій була встановлена випарювальна камера, завданням якої було віддалити різк каналу фурми від безпосереднього контакту з чавуном. Конструкція фурм з випарними камерами дозволила практично виключити закупорки каналу фурм. Виконані дослідження взаємодії магнію з рідким чавуном стали науковою базою для створення сучасного високоавтоматизованого процесу позапічного рафінування чавуну моноінжекцією магнію без добавок. Найбільш успішне застосування ця технологія отримала при створенні модернізованих комплексів на підприємствах Китаю. Починаючи з 2001 року, на 39 заводах КНР споруджено і введено в експлуатацію 84 комплексу позапічної десульфурзації чавуну і скачування шлаку за технологією ІЧМ з сумарною потужністю понад 100 млн. т/рік низькосірчистого і очищеного від шлаку чавуну.

Ключові слова: позапічна десульфурация чавуну, еволюція, гранульований магній, фурми, испарительная камера, історія

Shevchenko A.P., Dr. Sci. (Engin.), Professor, Leading Researcher, ORCID 0000-0003-0867-6825

Kislyakov V.G., PhD (Engin.), Senior Researcher, Head of Department, ORCID 0000-0002-1775-5050

Dvoskin B.W., PhD (Engin.), Senior Researcher, ORSID 0000-0003-2891-7833;

Vergun A.S., Dr. Sci., (Engin.), Senior Research Scientist, ORCID 0000-0001- 5493-9214

Manachyn I.A., PhD (Engin.), Senior Researcher, ORCID 0000-0001-9795-6751

Petrusha V.P., Lead Engineer

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2019. – Вип.33

«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33

ISSN 2522-9117 *«Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii». – 2019. – Vypusk 33*

Shevchenko S.A., Ph.D., Senior Researcher, ORSID 0000-0002-9287-9177

Iron and Steel Institute named after Z.I. Nekrasov of the NAS of Ukraine

Stages of scientific and applied activities of the department of external processing of the iron of ISI NANU

Summary. The history of the creation and development of the research unit of the Iron and Steel Institute, the department of after-furnace treatment of cast iron is presented. From 1939 to 1983, this structural unit of the ISI was headed by Doctor of Technical Sciences, Professor Natalya Aleksandrovna Voronova, then for 34 years, until 2017, the student and associate of N.A. Voronova – Doctor of Technical Sciences, Professor Shevchenko A.F., from 2017 to the present, the department is headed by Kislyakov V.G. During this period, a set of scientific research and development has provided an opportunity for the department staff to defend 3 doctoral and 16 master's theses. Two employees of the department were awarded the academic title of professor, and ten – senior research assistant. The evolution of the technological process and equipment for the processing of cast iron by granular magnesium in ladles of various capacities is shown. In particular, it was not possible to inject granular magnesium without additives with lances used to inject mixtures of magnesium with fillers into the melt due to blockage of the channel of the magnesium wire at the outlet of the lance. To solve this problem, a lance of a new design was developed, at the outlet of the channel of which an evaporation chamber was installed, the task of which was to remove the section of the lance channel from direct contact with cast iron. The design of tuyeres with evaporation chambers made it possible to virtually eliminate blockages of the tuyere channel. The studies of the interaction of magnesium with molten iron became the scientific basis for the creation of a modern highly automated process for the secondary refining of cast iron by mono-injection of magnesium without additives. This technology received the most successful application in the creation of modernized complexes at Chinese enterprises. Since 2001, 84 complexes of out-of-furnace desulphurization of pig iron and slag download using ISI technology with a total capacity of over 100 million tons/year of low-sulfur and pig iron-free slag have been built and commissioned at 39 plants in China.

Keywords: extra-furnace desulfurization of pig iron, evolution, granular magnesium, tuyeres, evaporation chamber, history

For citation: *Shevchenko S.O., Shevchenko A.P., Tolstopyat A.P., Fler L.A., Elyseev V.Y. Doslidzhennya shvydkosti dyspersnykh chastynok pry riznykh kutakh dilennya dvofaznoho potoku. [Investigation of the velocity of dispersed particles at different angles of division of a two-phase flow.]. «Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii».[Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy J 2020, 34. 87-97. (In Russian). DOI 10.52150/2522-9117-2019-33-87-97*

Статья поступила в редакцию сборника 15.11.2019 года, прошла внутреннее и внешнее рецензирование (Протокол заседания редакционной коллегии сборника №2 от 23 декабря 2019 года)

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії. – 2019. – Вип.33 «Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33 ISSN 2522-9117 «Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii». – 2019. – Vypusk 33

А.В. Остапенко, н.с.**С.А. Шевченко**, к.т.н., с.н.с., ORSID 0000-0002-9287-9177**В.Г. Кисляков**, к.т.н., с.н.с., зав. отделом, ORSID 0000-0002-1775-5050**И.А. Маначин**, к.т.н., с.н.с., ORSID 0000-0001-9795-6751*Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины*

ВЛИЯНИЕ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЯ ПОТОКА НА РАВНОМЕРНОСТЬ ДВИЖЕНИЯ ДВУХФАЗНОГО ПОТОКА НА ОСНОВЕ ЗЕРНИСТОГО МАГНИЯ

Аннотация. Целью работы являлось изучение, с помощью лабораторной установки, влияния существующей конструкции переключателя потока на равномерность движения двухфазного потока, состоящего из зернистого магния и сжатого газа. На основе типичной схемы компоновки инжекционных систем для вдувания зернистого магния на установках десульфурации чугуна в ковшах создана лабораторная установка, позволяющая сгенерировать устойчивый равномерный поток зернистого магния в струе сжатого воздуха. Поток пропускали через прозрачную натурную модель стандартного узла переключения потока на три фурмы, при этом изменялся угол наклона самого устройства, переключателя потока. Процесс фиксировали видеосъемкой. Покадровый анализ полученного видеоизображения позволил изучить влияние существующей конструкции переключателя потока при разных углах наклона на равномерность движения двухфазного потока по тракту инжекционной системы в процессе ковшевой десульфурации расплава чугуна зернистым магнием. Представленные исследования позволили установить основные причины и выявить механизм зарождения пульсаций в полости исследуемого узла переключателя потока. Показано, что объем полости переключателя способствует накоплению в нем магния и при наклоне более 22° к горизонту возникает самопроизвольное ссыпание скопившегося магния в полости, что и являет собою основную причину возникновения пульсаций. Разработанные на основе результатов исследований рекомендации и реализация их на действующей установке десульфурации чугуна в 100 тонных ковшах нового сталзавода Циндаоского меткомбината (г. Циндао, КНР, 2016 г.) позволили снизить бурность во время обработки и обеспечить устойчивый ввод реагента с двукратной интенсивностью.

Ключевые слова: чугун, переключатель потока, зернистый магний, пульсация

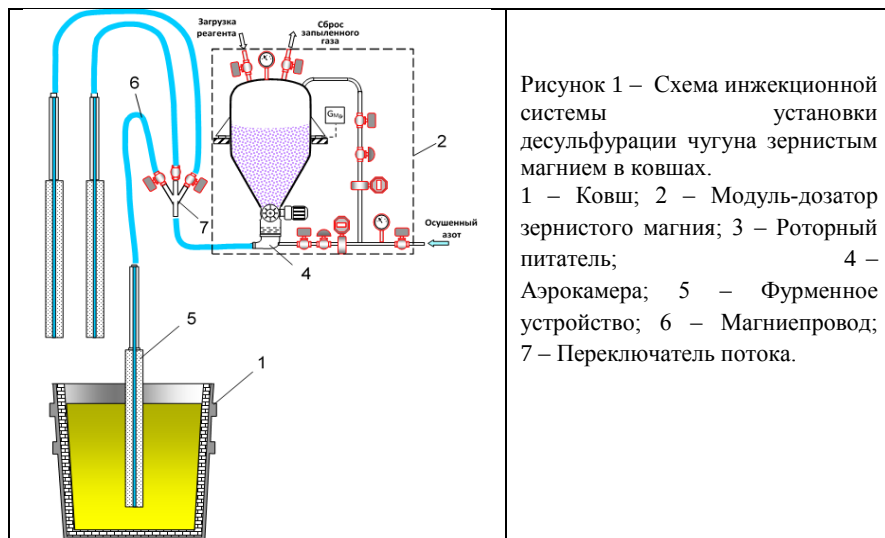
Ссылка для цитирования: *Ostapenko A.V., Shevchenko S.A., Kislyakov V.G., Manachin I.A. Effect of a flow switch on the uniformity of a two-phase flow based on granular magnesium. // «Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2019. - Вып.33. – С.98-105. (In Russian). DOI 10.52150/2522-9117-2019-33-98-105*

Состояние вопроса. При проектировании инжекционных систем для

*«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2019. - Вып.33
«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33
ISSN 2522-9117 «Fundamental'nye i prikladnye problemy černoј metallurgії». – 2019. – Vypusk*

десульфурации расплава чугуна зернистым магнием в ковшах особое внимание уделяется равномерности дозирования и ввода реагента на глубину расплава. Поскольку лишняя порция магния, моментально испаряясь, может привести к бурному барботажу ванны и появлению опасных выплесков металла из ковша [1]. Поэтому для дозирования зернистого магния используют только устройства с роторным питателем [2], обеспечивающее равномерную, стабильную выдачу реагента с заданной интенсивностью независимо от изменений параметров транспортирующего газа: расход, давление. Тракт инжекционной системы комплектуется исходя из условий устойчивого пневмотранспортирования зернистого магния, когда скорость газового потока значительно выше скорости витания твердых частиц, при этом исключаются уступы, резкие повороты, препятствия, все что может мешать свободному движению частиц [3].

На рис. 1 приведена схема инжекционной системы для вдувания зернистого магния под уровень расплава с возможностью подключения трёх фурменных устройств, которая была реализована на ряде современных комплексах десульфурации чугуна в ковшах по технологии Института черной металлургии [4].



В основе схемы находится дозирующее устройство, обеспечивающее стабильную и равномерную выдачу магния из бункера. Зернистый магний и подаваемый транспортирующий газ, смешиваясь в азорокамере,

образуют равномерный двухфазный поток, который по тракту магниепровода подводится непосредственно к фурме. Поскольку на УДЧ к одному дозирующему устройству подключено, как правило, два или три фурменных устройства, то для подачи газо-магниевого смеси на определенную фурму используется переключатель потока, оснащенный соответствующим количеством отсечных клапанов. Конструкция существующего переключателя потока на три фурмы приведена на рис. 2.

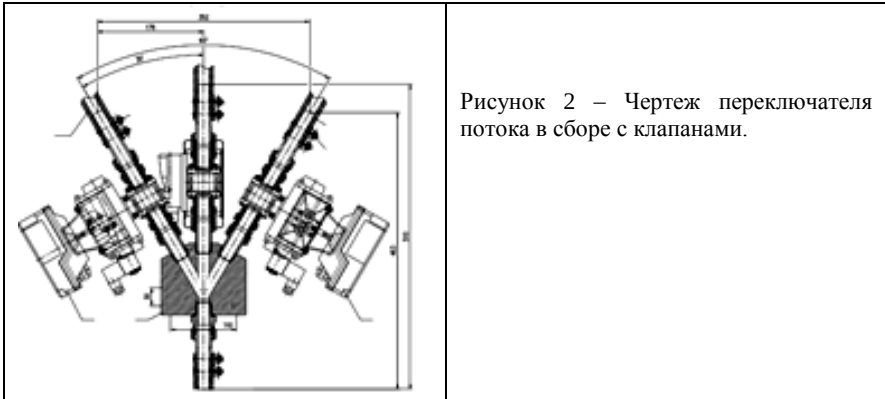


Рисунок 2 – Чертеж переключателя потока в сборе с клапанами.

Из рисунка видно, что тракт переключателя потока имеет переменное сечение, расширение в 2 – 3 диаметра и внезапное сужение на диаметр выходного отверстия, дополнительно происходит поворот направления движения потока на 10 – 20° и наличие 1 – 2 тупиковых отводов. Такая геометрия тракта может оказывать существенное влияние на движение твердых частиц в потоке. В связи с этим, данная работа направлена на изучение, с помощью лабораторной установки, влияния существующей конструкции переключателя потока на равномерность движения двухфазного потока на основе зернистого магния.

Целью работы являлось изучение, с помощью лабораторной установки, влияния существующей конструкции переключателя потока на равномерность движения двухфазного потока на основе зернистого магния.

Описание эксперимента. Для проведения исследований был собран лабораторный стенд (Рис. 3) включающий в себя блок подготовки воздуха, дозирующее устройство зернистого магния, модель участка магниепровода с переключателем потока на три фурмы, улавливатель зернистого магния. Переключатель потока выполнен из прозрачного материала и имеет три отвода, с углом отклонения (для боковых отводов) 30°. Не задействованные отводы закрыты съемными заглушками. Стенд

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2019. - Вип.33

«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33

ISSN 2522-9117 «Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii». – 2019. – Vypusk 33

позволяет изменять угол наклона переключателя потока от 0 до 90° к горизонту. Процесс движения зернистого магния через переключатель фиксировался цифровой камерой с частотой изображения 24 кадра/с в течении 10 секунд, в последующем осуществлялась раскадровка видео изображения на отдельные кадры. В результате получено 10 серий изображения, где рассмотрены варианты осевого и бокового подключения отвода потока при различных углах наклона плоскости, к которой прикреплен переключатель потока: 0, 22, 45 и 90° к горизонту.

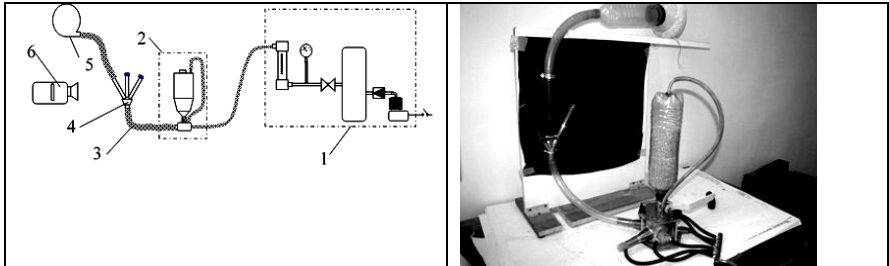


Рисунок 3 – Схема и вид лабораторной установки. 1 – блок управляемой подачи сжатого газа, 2 – дозирующее устройство для твердой фазы, 3 – материалопровод, 4 – переключатель потока, 5 – улавливатель твердой фазы, 6 – цифровая видеокамера.

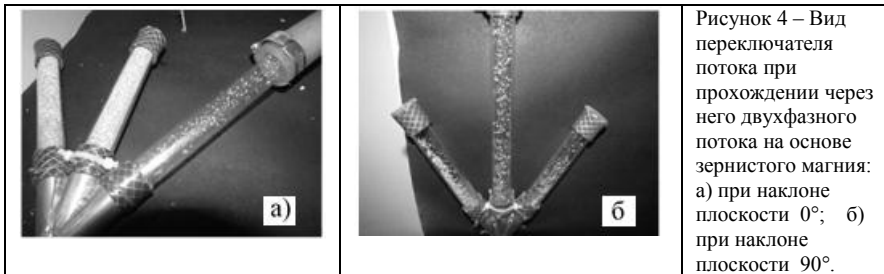
Анализ результатов. Анализ изображения показал, что при углах наклона 0 – 22° в процессе прохождения двухфазного потока через переключатель потока происходит накопление в полости тупиковых отводов твердой фазы независимо от позиции рабочего отвода, по центру или с боку. Заполнив полость тупиковых отводов, при указанных углах наклона, твердая фаза остается неподвижной и практически не вносит пульсации в действующий поток. При наклоне плоскости с углом более 22° накапливаемый магний в тупиковых отводах ссыпается, внося значительную неравномерность в существующий поток. В том числе, при угле 90° видна пульсация концентрации твердой фазы в полости тупиковых отводов независимо от позиции рабочего отвода, по центру или с боку (рис. 4).

Установленное в ходе эксперимента явление указывает на то, что при компоновке инъекционных систем рафинирования расплава чугуна зернистым магнием необходимо обеспечивать наклон плоскости переключателя потока не более 22° к горизонту. В противном случае, полость переключателя будет являться источником пульсаций концентрации реагента в потоке, что в итоге приведет к повышению бурности процесса обработки и выплескам чугуна из ковша. Логичной является взаимосвязь, чем больше объем полости переключателя, тем

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2019. - Вип.33

«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33

ISSN 2522-9117 «Fundamental'nye i prikladnye problemy černoј metallurgii». – 2019. – Vypusk 33



Подтверждением полученного результата исследований является имеющийся опыт при выполнении пусконаладочных работ по настройке инжекционной системы установки десульфурации чугуна в 100 тонных ковшах нового сталейзавода Циндаоского меткомбината [4] (г. Циндао, КНР, 2016 г.), где переключатель потока имел три отвода на фурмы и в силу ограниченности площади под проектирование УДЧ, был расположен в вертикальной плоскости. В результате чего, характер обработок был бурным с периодическими выплесками чугуна из ковша. Допустимая интенсивность подачи магния была ниже 5 кг/мин. После выявления причины, благодаря представленным исследованиям, переключатель потока был установлен в горизонтальном положении, что позволило избавиться от бурного характера обработки и поднять интенсивность ввода магния до 10-12 кг/мин. Но, при этом, после обработки в отводах переключателя остается скопившейся магний, что может создавать проблему в случае длительного простоя УДЧ.

Выводы. Представленные исследования позволили выявить механизм влияния элементов трассы материалопровода, в частности переключателя потока, на равномерность движения двухфазного потока на основе зернистого магния при инжектировании его в расплав на установках ковшевой десульфурации чугуна. Промышленный опыт показал, что расположение существующей конструкции переключателя потока в вертикальной плоскости приводит к повышению бурности обработки, выплескам чугуна из ковша и вынужденному снижению интенсивности подачи реагента.

Полученные результаты исследований позволили получить рекомендации по рациональному расположению переключателя потока, реализация которых в промышленных условиях позволила снизить бурность во время обработки и обеспечить устойчивый ввод реагента с двукратной интенсивностью.

Бібліографічний список

1. Воронова Н.А. Десульфурация чугуна магнием. – М.: Металлургия, 1980. – 239 с.
2. Пат. 67533 А Украины. (UA) 7 C21C1/02. Установка для десульфурации чугуна гранулированным магнием в большегрузном ковше. [В.И. Большаков, А.П. Белый, В.А. Александров и др.]. Заявитель и патентодержатель Институт черной металлургии НАН Украины. – 15.06.2004 Бюл. № 6.
3. Шевченко С.А. Разработка научных положений и технологии инжекционного процесса десульфурации чугуна диспергированным магнием в большегрузных ковшах. Канд. диссертация. Днепропетровск. – 2010. – 217 с.
4. Шевченко А.Ф., Вергун А.С. Башмаков А.М. Особо глубокая десульфурация чугуна (0,001 – 0,002% серы) и высокая производительность вдуванием зернистого магния. [А.Ф. Шевченко, А.С. Вергун, А.М. Башмаков и др.] // Металл и литье Украины – 2018. – № 3-4 – С. 3–8.

Reference

1. Voronova N.A. (1980). Desulfurization of cast iron with magnesium [Desulfurization of cast iron with magnesium]. Moskva: Metallurgiya, 1980, 239 p. (In Russian).
2. Bol'shakov V.I., Belyj A.P. & Aleksandrov V.A. et al. (2004). Ustanovka dlya desulfuracii chuguna granulirovanny'm magniem v bol'shegruznom kovshe [Installation for desulfurization of cast iron with granular magnesium in a heavy-duty ladle.] UA Patent 67533. Institut chernoj metallurgii NAN Ukrainy` (2004), (In Russian).
3. Shevchenko S.A. (2010). Razrabotka nauchny'kh polozhenij i tekhnologii inzhektionsnogo proccessa desulfuracii chuguna dispergirovanny'm magniem v bol'shegruzny'kh kovshakh. [Development of scientific provisions and technology for the injection process of desulfurization of cast iron with dispersed magnesium in heavy-duty ladles]. (Kand. Dissertacija). Dnepropetrovsk, 2010, 217 p. (In Russian).
4. Shevchenko A.F., Vergun A.S. & Bashmakov A.M. et al. (2018). Osobo glubokaya desulfuraciya chuguna (0,001 – 0,002% sery) i vy'sokaya proizvoditel'nost' vduvaniem zernistogo magniya [Extra deep desulfurization of cast iron (0.001 - 0.002% sulfur) and high productivity by blowing granular magnesium]. *Metall i lit'e Ukrainy` [Metal and casting of Ukraine]*, 2018, 3-4, 3–8. (In Russian).

О.В. Остапенко, н.с.

С.А. Шевченко, к.т.н., с.н.с., ORSID 0000-0002-9287-9177

В.Г. Кисляков, к.т.н., с.н.с., зав. відділом, ORSID 0000-0002-1775-5050

І.О. Маначин, к.т.н., с.н.с., ORSID 0000-0001-9795-6751

Вплив перемикача потоку на рівномірний рух двофазного потоку на основі зернистого магнію

Анотація. Метою роботи було вивчення за допомогою лабораторної установки впливу існуючої конструкції перемикача потоку на рівномірність руху двофазного потоку, що складається з зернистого магнію і стисненого газу. На основі типової схеми компонування інжекційних систем для вдування зернистого магнію на установках десульфуратії чавуну в ковшах створено лабораторну

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2019. - Вип.33

«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33

ISSN 2522-9117 «Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii». – 2019. – Vypusk 33

установку, що дозволяє згенерувати стійкий рівномірний потік зернистого магнію в струмені стисненого повітря. Потік пропускали через прозору натурну модель стандартного вузла перемикача потоку на три фурми, при цьому змінювався кут нахилу самого пристрою перемикача потоку. Процес фіксували шляхом відеозйомки. По кадровий аналіз відеозображення що отримано дозволив вивчити вплив існуючої конструкції перемикача потоку при різних кутах нахилу на рівномірність руху двофазного потоку по тракту інжекційної системи в процесі ковшової десульфурзації розплаву чавуну зернистим магнієм. Представлені дослідження дозволили встановити основні причини та виявити механізм зародження пульсацій в порожнинах досліджуваного вузла перемикача потоку. Показано, що обсяг порожнини перемикача сприяє накопиченню в ньому магнію і під кутом нахилу більше 22° до горизонту виникає мимовільне зсипання магнію що скупчився в порожнині, що і являє собою основну причину виникнення пульсацій. Розроблені на основі результатів досліджень рекомендації та реалізація їх на діючій установці десульфурзації чавуну в 100 тонних ковшах нового сталзаводу Циндаоського меткомбінату (м Циндао, КНР, 2016 р.) дозволили знизити бурхливість під час обробки і забезпечити стійкий введення реагенту з інтенсивністю збільшеною в двічі.

Ключові слова: чавун, перемикач потоку, зернистий магній, пульсація.

A.V. Ostapenko, Researcher

S.A. Shevchenko, Ph.D., Senior Researcher, ORSID 0000-0002-9287-9177

V.G. Kislyakov, PhD (Engin.), Senior Researcher, Head of Department, ORCID 0000-0002-1775-5050

I.O. Manachin, PhD (Engin.), Senior Researcher, ORCID 0000-0001-9795-6751

Iron and Steel Institute named after Z.I. Nekrasov of the NAS of Ukraine

Effect of flow switch on two phase flow evenness based on granular magnesium.

The aim of the work was to study, with the help of a laboratory setup, the influence of the existing design of the flow switch on the uniformity of movement of a two-phase flow, consisting of granular magnesium and compressed gas. On the basis of a typical layout of injection systems for the injection of granular magnesium at the pig iron desulphurization plants in the ladles, a laboratory installation has been created that allows the generation of a stable uniform flow of granular magnesium in a stream of compressed air. The stream was passed through a transparent full-scale model of a standard unit for switching the flow into three lances, while the angle of inclination of the device itself, the flow switch, changed. The process was recorded by video. The frame-by-frame analysis of the video image made it possible to study the effect of the existing design of the flow switch at different angles of inclination on the uniformity of the movement of the two-phase flow along the path of the injection system during ladle desulfurization of the molten iron with granular magnesium. The presented studies made it possible to establish the main causes and reveal the mechanism of the generation of pulsations in the cavity of the studied node of the flow switch. It is shown that the volume of the switch cavity contributes to the accumulation of magnesium in it and when tilting more than 22° to the horizon, spontaneous pouring of the accumulated

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2019. – Вип.33

«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33

ISSN 2522-9117 «Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii». – 2019. – Vypusk 33

magnesium in the cavity occurs, which is the main reason for the occurrence of pulsations. The recommendations developed on the basis of the research results and their implementation on the existing cast iron desulfurization unit in 100 ton buckets of the new steel plant of the Qingdao Steel Plant (Qingdao, PRC, 2016) made it possible to reduce roughness during processing and ensure stable reagent injection with a double intensity.

Key words: cast iron, flow switch, granular magnesium, pulsation.

For citation: Ostapenko O.V., Shevchenko S.A., Kyslyakov V.H., Manachyn .O. Vplyv peremykacha potoku na rivnomirnyy rukh dvofaznoho potoku na osnovi zernystoho mahniyu. [Influence of flow switch on uniform motion of two-phase flow based on granular magnesium.]. *«Fundamental'nye i prikladnye problemy černej metallurgii»*. [Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy] 2020, 34. 98-105. (In Russian). DOI 10.52150/2522-9117-2019-33-98-105

*Статья поступила в редакцию сборника 19.10.2019 года,
прошла внутреннее и внешнее рецензирование (Протокол заседания
редакционной коллегии сборника №2 от 23 декабря 2019 года)*

Д.Н. Тогобицкая, д.т.н., проф., зав.отделом, ORSID 0000-0001-6413-4823

А.С. Вергун, д.т.н., с.н.с., ORSID 0000-0001-5493-9214

Л.С. Молчанов, к.т.н., с.н.с., ; ORSID 0000-0001-6139-5956

В.Г. Кисляков, к.т.н., с.н.с., зав. отделом, ORSID 0000-0002-1775-5050

Ю.М. Лихачев, н.с.,

Н.Е. Ходотова, м.н.с.

ПОДСИСТЕМА «ВОЧ» В РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ВЫБОРА РАЦИОНАЛЬНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ КАЧЕСТВЕННОЙ МЕТАЛЛОПРОДУКЦИИ В СЛОЖИВШИХСЯ СЫРЬЕВЫХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины

Аннотация. Создание сквозной технологии производства конкурентоспособной металлопродукции в современных условиях ставит на повестку дня задачу оптимизации многозвеньевой цепи получения металла. В решении указанной задачи значительная роль принадлежит разработке информационно-моделирующей системы анализа и принятия решений для выбора оптимальной схемы технологии. Важным звеном сквозной технологии является внепечная обработка чугуна. Как показал анализ различных технологических решений по десульфурации чугуна, в настоящее время наиболее экономичным, рациональным и предпочтительным является процесс, разработанный в Институте черной металлургии. Процесс реализуется путем вдувания через погружаемые фурмы диспергированного зернистого магний без добавок. Используются специальной системы дозирования и инжекции. Показано, что разработанный процесс прошел многочисленное промышленное опробование на отечественных и зарубежных заводах. Для оптимизации процесса сквозной технологии и ее информационно-математического обеспечения разработаны модульные математические модели. Создана интегрированная база данных, обобщающая информацию о параметрах технологии десульфурации чугуна зернистым магнием. Описана и представлена экспертная система «Внепечная обработка чугуна», позволяющая обеспечить получение высококачественной металлопродукции. Изучена адекватность разработанной модели для прогнозирования удельного расхода магния при внепечной обработке чугуна. Выполненные разработки создали предпосылки для построения архитектуры Экспертной системы принятия решений. Пополнение базы данных информацией текущих и других технологий десульфурации чугуна позволит уточнить существующие и получить описательные модели для различных реагентов, которые послужат основой для алгоритмического обеспечения аналитического блока экспертной системы.

Ключевые слова: десульфурация, чугун, магний, информационная система, модель.

Ссылка для цитирования: Тогобицкая Д.Н., Вергун А.С., Молчанов Л.С., Кисляков В.Г., Лихачев Ю.М., Ходотова Н.Е. Подсистема «Внепечная обработка чугуна» в решении задач выбора рациональной технологии получения качественной металлопродукции в сложившихся сырьевых и технологических

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2019. - Вип.33

«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33

ISSN 2522-9117 *«Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii». – 2019. – Vypusk*

условиях. //«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2019. - Вип.33. – С.3-32. (In Russian). DOI 10.52150/2522-9117-2019-33-105-115

Современное состояние вопроса. Метод комплексной оценки показателей процессов внепечной десульфурации чугуна глубоко и всесторонне проанализирован в работе [1]. Как показал анализ различных технологических решений, в настоящее время из всех применяемых процессов внепечной десульфурации наиболее экономичным, рациональным и предпочтительным является разработанный в Институте черной металлургии процесс внепечной десульфурации чугуна вдуванием диспергированного (зернистого) магнезия без разубоживающих добавок через погружаемые фурмы с применением специальной системы дозирования и инъекции.

Задачи внедоменной обработки чугуна, в большинстве своем физико-химически сложные и многофакторные. Они зависят от множества различных факторов, изменяющихся с течением времени и влияющие на формирование конечного продукта. Реальные эксперименты по исследованию поведения реальных параметров сложны, экономически затратные, а часто их проведение просто невозможно. Решить данную проблему помогают модели. Единая методология создания моделей по переделам по модульному принципу, в котором каждый вариант технологии представлен соответствующим модулем, позволяют обеспечить их наращивание в процессе развития алгоритмов и осуществить генерацию моделей металлургических процессов в единую сквозную модель с целью организации оптимальной схемы производства металла заданного качества при минимальных энергетических и сырьевых затратах.

Важность оперативной оценки металлургических свойств железорудного сырья и продуктов доменной плавки, а также отсутствие на металлургических предприятиях соответствующих установок для испытания материалов обусловили работы по созданию в Институте черной металлургии баз данных «Железорудные материалы», «Шлак», «Шлак-Металл-Газ» [2–5]. Результаты экспериментальных исследований, накопленных в базах, используются для разработки прогнозных моделей свойств железорудных материалов и получаемых из них расплавов с целью совершенствования методов управления производством высококачественного сырья и получения из них качественных продуктов плавки. В работе под руководством Старова Р.В. [6] для подсистемы «Внепечная обработка чугуна» получены уравнения, описывающие зависимость расхода реагента от начального и конечного содержания серы в чугуне, а также типа ковша.

Целью работы являлась разработка концептуальных основ и создание информационного ресурса подсистемы для изучения, выявления закономерностей и моделирования процессов внепечной обработки чугуна.

Основные результаты исследования. Согласно принятой концепции основой информационной технологии являются данные, учитывающие характеристики ковшей, химический состав и температуру чугуна, материалы-десульфураторы, а также состав чугуна и шлака по окончании обработки. Информация организованная в базу данных (БД), адекватно отражает реальные параметры технологий внепечной обработки чугуна. База данных (БД) представляет собой совокупность взаимосвязанных файлов данных определенной

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2019. - Вип.33

«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33

ISSN 2522-9117 «Fundamental'nye i prikladnye problemy černoј metallurgii». – 2019. – Vypusk 33

организации, регламентируемой соответствующим машинным паспортом в строгом соответствии с паспортизацией, принятой при создании отраслевого банка данных «Металлургия». [7]

Концептуально информационная система (ИС) предназначена для сбора и накопления информации, характеризующей технологию внепечной обработки чугуна и ее эффективного использования для всевозможных целей. Для работы с базой данных использована Информационная поисковая система (ИПС) разработки ИЧМ созданной с целью мобильности изменения средств ИПС и ее быстрой адаптации к реалиям технологии металлургии чугуна и стали, так и к потребностям Пользователей.

Основные компоненты ИПС – это программные средства, поисковый массив документов, средства поддержки информационного языка системы, обеспечивающий организацию и управление данными (ввод, хранение, защита, поиск и выдача) соответствующей информации. Он представляет собой набор ссылок на документы (или их описаний), хранящей основную информацию о них и организованный так, чтобы обеспечить оперативный поиск. Созданная БД организована для Пользователя, не имеющего опыта работы с информационными технологиями баз данных.

База данных по внепечной обработки чугуна «ВОЧ» является полнотекстовой формой организации документальной БД. Именно хранение текста (в полном или сокращенном объеме) дает возможность обеспечить тематический поиск по определенной проблеме или определенному вопросу, что регламентируется определенным запросом, обеспеченным гибким интерфейсом.

Адаптированная ИПС дает возможность:

- ввести документ, отредактировать его, произвести поиск и сформировать отчетные документы по результатам поиска в формате пользователя;
- хранить в БД документы разного типа (форматов);
- использовать для записи данных поля переменной (нефиксированной) длины;
- обеспечить хранение и работу с несколькими значениями одной характеристики в одном поле;
- реализовать гибкие поисковые функции (при работе с текстом).

Документ базы данных состоит из нескольких полей, которые объединяются в группы. Группа 1 описывает документальную часть базы (Таблица 1). Фактографическую часть описывает Таблица 2. Для поиска информации используются поля «Ключевые слова», «Авторы» и т.д.

Разработки информационно-математического обеспечения по созданию Экспертной системы «Десульфурация чугуна зернистым магнием» велись в трех направлениях.

Первое связано с развитием подсистемы информационного обеспечения. Разработан программный модуль автоматизированной процедуры пополнения форматизованных по специальному шаблону машинных паспортов из архива технологической информации Пользователя в среде Excel. Для актуализации базы данных и

многопланового поиска по поисковым образам (ключевые слова, авторы, предприятие, показатели технологии и т.д.) разработана программа, которая позволяет конвертировать информацию из Excel-файлов в структуру ИПС с целью пополнения ранее разработанной сотрудниками Отдела внепечной обработки чугуна технологической базы и формировать адекватные индексные и поисковые образы. Сервис работы с ИПС как указано ранее обеспечивает многоплановый поиск Пользователя, просмотр и выгрузку информации по любому реквизиту (ключевые слова, авторы, технология, предприятие и т.д.).

Таблица 1. Документальная часть базы

Ключевые слова	Магний, азот, фурма с испарителем
Авторы	к.т.н. Двоскин Б.В.
Название	Разработка технологических решений и документации в комплексе работ по проектированию и освоению УДЧ сталь завода №2 Тангшаньского МК
Издание	РМ.07.04 г., Днепропетровск. - 2005. - 44 с.
Реферат	Освоена технология десульфурации магнием со снижением содержания серы до 0,002%
Референт	к.т.н. Кисляков В.Г.
Эксперт	д.т.н. Шевченко А.Ф.
Предприятие	Тангшань – 2
Методика	Проведен осмотр и подготовка оборудования к работе. Проведены "холодные", "горячие" и гарантийные испытания работы установки. Химанализ проб чугуна выполнялся в хим. лаборатории предприятия и ИЧМ

Таблица 2 – Фактографическая часть базы

Параметры технологии										
Масса чугуна, т	Тем-ра нач., °С	Тем-ра кон., °С	Масса реаген-та, кг	Сера исх., %	Сера кон., %	Глубина погружения, м	Масса шлака, т	Интенсивность ввода, кг/мин	Расход газа носителя, нм ³ /ч	Время обработки, мин:сек
39,5	1286	1256	19,75	0,027	0,006	1,70	1,1	4	45	5:30
41,6	1322	1293	25,79	0,032	0,004	1,85	0,9	4	35	6:00
34,0	1351	1335	18,70	0,024	0,005	1,70	0,8	4,5	30	4:00
38,5	1317	1280	23,10	0,026	0,006	1,80	0,8	4,5	35	5:06
37,0	1286	1255	23,31	0,034	0,005	1,85	0,8	4,5	35	5:01
38,5	1240	1208	23,49	0,055	0,005	1,80	0,8	4,5	35	5:08

Второе направление разработок связано с изучением адекватности разработанной модели прогнозирования удельного расхода металлического магния при внепечной обработке чугуна, а также оценки роли отдельных составляющих модели (1).

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2019. - Вип.33

«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33

ISSN 2522-9117 «Fundamental'nye i prikladnye problemy černoј metallurgii». – 2019. – Vypusk 33

$$Mg_{Mg}^* = X1 \cdot (X2 + X3 + X4 - X5 - X6) \quad (1)$$

где:

$$X1 = 10,5475 \cdot S_{нач.} + \frac{0,00095}{S_{кон.}} \quad ; \quad X2 = \frac{M_{чуг}^{\Phi}}{52,4} \quad ;$$

$$X3 = \frac{(T_{\Phi} - 1325)}{100} \cdot \left(\frac{112,605 + (0,1844 \cdot T_{\Phi} - 385,22)}{112,605} \right) \quad ;$$

$$X4 = (I_{\Phi} - 5,26) \cdot 0,0979 \quad ;$$

$$X5 = (H_{\Phi} - 1,86) \cdot \left(\frac{-108,63}{0,00004 \cdot H_{\Phi}^2 - 0,0005 \cdot H_{\Phi} - 108,63} - 1 \right) ;$$

$$X6 = (q_{шл}^{\Phi} - 2,8) \cdot 0,019.$$

Здесь: $S_{нач.}$ – начальное содержание серы в чугуне, %;

$S_{кон.}$ – конечное содержание серы в чугуне после обработки, %;

$M_{чуг}^{\Phi}$ и 52,4 – фактическая и стандартная для ядра модели масса чугуна соответственно, т.;

T_{Φ} и 1325 – температура фактическая обработки и стандартная для ядра модели, соответственно, °C;

H_{Φ} и 1,86 – глубина погружения фурмы при обработке фактическая и стандартная для ядра модели, м;

I_{Φ} и 5,26 – интенсивность ввода магния фактическая и стандартная для ядра модели, кг/мин.;

$q_{шл}^{\Phi}$ и 2,8 – количество шлака до обработки фактическое и стандартное для ядра модели, %.

Как следует из рис. 1 основной вклад в описательную модель вносит факторная составляющая $X1$ (ядро), которая описывает соотношение требуемого и начального содержания серы в чугуне [8].

Используемая ранее аппроксимация этой составляющей аналитическим выражением (2) в отдельных случаях несколько повышает точность модели (рис.1), однако в случае выражение структуры (1) является более предпочтительным.

$$q = 0,2765 + 19,2042 \cdot (S_{нач} + 0,008) - 40,759 \cdot S_{кон} - \\ - 149,14 \cdot (S_{нач} + 0,008)^2 + 76,19 \cdot (S_{нач} + 0,008) \cdot S_{кон} + 441,63 \cdot S_{кон}^2$$

(2),

где: q – удельный массовый расход реагента, кг/т.

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2019. - Вип.33

«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33

ISSN 2522-9117 «Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii». – 2019. – Vypusk 33

Третье направление связано с разработкой архитектуры модельной системы для экспертной оценки внепечного рафинирования чугуна.

Выполненные разработки создали предпосылки для построения архитектуры Экспертной системы принятия решений, макросхема которой представлена на рис. 2.

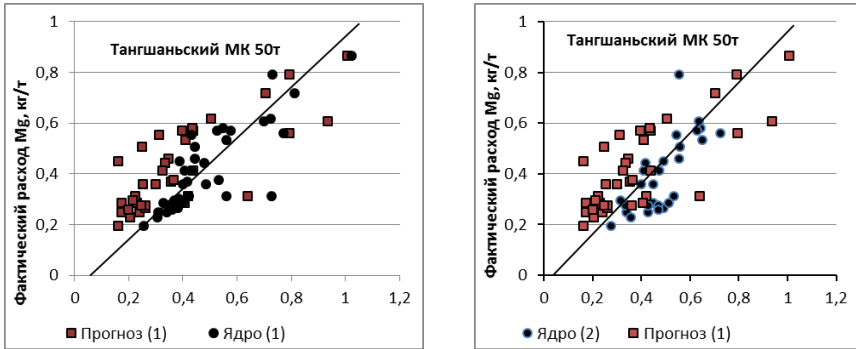


Рисунок 1 – Сопоставительный анализ расчетных и фактических значений расхода металлического магния на десульфурацию чугуна

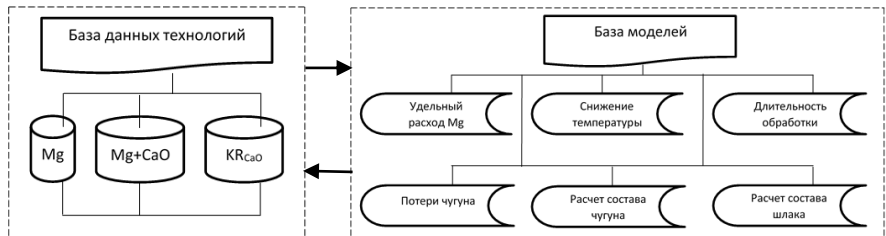


Рисунок 2 – Схема информационно-математического обеспечения алгоритма системы внепечной обработки чугуна

Выводы.

1. Создана интегрированная база данных, обобщающая информацию о параметрах разработанной и прошедшей многочисленное промышленное опробование на отечественных и зарубежных условиях десульфурация чугуна зернистым магнием. В комплексе с разработанной ИПС обеспечивается оперативный поиск информации как в полном так и в любом усеченном виде с выгрузкой данных в Excel формате.

2. Созданная база технологических данных позволила разработать соответствующие прогнозные модели благодаря заложенной концепции работы баз данных и моделей в режиме взаимной дополнителности.

3. Пополнение базы данных информацией текущих и других технологий десульфурации чугуна позволит уточнить существующие и

получить описательные модели для различных реагентов, которые послужат основой для алгоритмического обеспечения аналитического блока Экспертной системы.

Библіографічний список

1. Шевченко А.Ф. Комплексный подход при выборе и оценке технологии внепечной десульфурации чугуна // Сб. трудов ИЧМ НАН Украины. Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. – К.: Наукова думка. 2010. – С. 106-120.
2. Приходько Э.В. Базы физико-химических и технологических данных для создания информационных технологий в металлургии / Э.В. Приходько, Д.Н. Тогобицкая // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 1999. – №3. – С. 17-21.
3. Приходько Э.В. Прогнозирование физико-химических свойств окисленных систем. / Э.В. Приходько, Д.Н. Тогобицкая, А.Ф. Хамхотько, Д.А. Степаненко. – Днепропетровск: Пороги, 2013. – 344 С.
4. Скачко А.С. Базы данных и моделей для прогнозирования свойств железорудных материалов / А.С. Скачко, Д.Н. Тогобицкая, А.И. Белькова, Ю.М. Лихачев // Материалы XIII Всеукраинской научно-практической конференции «Специальная металлургия: вчера, сегодня, завтра» – г. Киев, 21 апреля 2015 г. – С. 816-826.
5. Тогобицкая Д.Н. Белькова А.И., Гринько А.Ю. Моделирование процессов взаимодействия расплавов в восстановительных условиях доменной плавки. // Математичне моделювання. – Дніпродзержинськ. – 2011. – №2(25). – С. 54-59.
6. Старов Р.В. Сквозная модель производства жидкого металла, включающая технологию доменной и конвертерной плавки, внепечной обработки чугуна и стали / Р.В. Старов, Д.Н. Тогобицкая, В.С. Харахулах, Н.А. Гладков, Г.Г. Магхуио // Металл и литье Украины. – Киев. – 1995 №1. – С. 10-15.
7. Жмойдин Г.И. О паспортизации экспериментальных материалов для банка данных «Металлургия» / Г.И. Жмойдин, Э.В. Приходько, Д.Н. Тогобицкая, А.Ф. Хамхотько, Ю.М. Лихачев // Изв. ВУЗов. Черная металлургия. – 1988. – №8. – С.136-139.
8. Шевченко А.Ф., Маначин И.А., Вергун А.С. и др. Внепечная десульфурация чугуна в ковшах. Технология. Исследования. Анализ. Совершенствование. Днепропетровск. "Дніпро-VAL". – 2017. – 253 с.

Reference

1. Shevchenko A.F. (2010). Kompleksnyj podhod pri vybere i ocenke tehnologii vnepechnoj desulfuracii chuguna [An integrated approach to the selection and assessment of the technology for secondary desulfurization of cast iron]. *Fundamental'nye i prikladnye problemy chernoj metallurgii. Sb. trudov ISI NAN Ukrainy [Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy. Collection of scientific articles ISI NANU]*. Kiev: Naukova dumka, 2010, 106-120. (In Russian).
2. Prihod'ko E.V., & Togobickaya D.N. (1999). Bazy fiziko-himicheskikh i tehnologicheskikh dannyh dlya sozdaniya informacionnyh tehnologij v metallurgii

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2019. – Вип.33

«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33

ISSN 2522-9117 «Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii». – 2019. – Vypusk 33

- [Databases of physical, chemical and technological data for the creation of information technologies in metallurgy]. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost* [Metallurgical and mining industry], 1999, 3, 17-21. (In Russian).
3. Prihod'ko E.V., Togobickaya D.N., Hamhot'ko A.F. & Stepanenko D.A. (2013). *Prognozirovanie fiziko-himicheskikh svoystv oksilennykh sistem* [Prediction of the physicochemical properties of oxidized systems]. Dnepropetrovsk: Porogi, 2013, 344 p. (In Russian).
 4. Skachko A.S., Togobickaya D.N., Bel'kova A.I. & Lihachev Yu.M. (2015). Bazy dannyh i modelej dlya prognozirovaniya svoystv zhelezorudnykh materialov. [Databases and models for predicting the properties of iron ore materials]. *Materialy XIII Vseukrainskoj nauchno-prakticheskoy konferencii: Special'naya metallurgiya: vchera, segodnya, zavtra (21 aprelya 2015 g)* [Materials of the XIII All-Ukrainian Scientific and Practical Conference: Special Metallurgy: Yesterday, Today, Tomorrow], Kiev, 2015, 816-826pp. (In Russian).
 5. Togobickaya D.N., Bel'kova A.I. & Grin'ko A.Yu. (2011). Modelirovanie processov vzaimodejstviya rasplavov v vosstanovitel'nykh usloviyah domennoj plavki [Modeling the processes of interaction of melts in the reducing conditions of blast furnace smelting]. *Matematichne modelyuvannya* [Mathematical modeling]. Dniprodzerzhinsk, 2011, 2(25), 54-59. (In Russian).
 6. Starov R.V., Togobickaya D.N., Harahulah V.S., Gladkov N.A. & Matuhio G.G. (1995). Skvoznaya model' proizvodstva zhidkogo metalla, vklyuchayuschaya tehnologiyu domennoj i konverternoj plavok, vnepechnoj obrabotki chuguna i stali [End-to-end model for the production of liquid metal, including the technology of blast-furnace and converter smelting, secondary processing of cast iron and steel]. *Metall i lit'e Ukrainy* [Metal and casting of Ukraine], 1995, 1, 10-15. (In Russian).
 7. Zhmojdin G.I., Prihod'ko E.V., Togobickaya D.N., Hamhot'ko A.F., & Lihachev Yu.M. (1988). O pasportizacii `eksperimental'nykh materialov dlya banka dannyh "Metallurgiya" [About certification of experimental materials for the database "Metallurgy"]. *Izv. VUZov. Chernaya metallurgiya* [Izvestiya. Ferrous metallurgy], 1988, 8, 136-139. (In Russian).
 8. Shevchenko A.F., Manachin I.A. & Vergun A.S. et al. (2017). Vnepechnaya desul'furaciya chuguna v kovshah [Out-of-furnace desulfurization of cast iron in ladles]. *Tehnologiya. Issledovaniya. Analiz. Sovershenstvovanie* [Technology. Research. Analysis. Improvement]. Dnepropetrovsk: Dnipro-VAL, 2017, 253 p. (In Russian).

Д.М. Тогобицька, д.т.н., проф., зав.відділом, ORSID 0000-0001-6413-4823

О.С. Вергун, д.т.н., с.н.с., ORSID 0000-0001-5493-9214

Л.С. Молчанов, к.т.н., с.н.с., ; ORSID 0000-0001-6139-5956

В.Г. Кисляков, к.т.н., с.н.с., зав.відділом, ORSID 0000-0002-1775-5050

Ю.М. Ліхачов, н.с.

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2019. – Вип.33

«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33

ISSN 2522-9117 «Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii». – 2019. – Vypusk 33

Н.С. Ходотова, м.н.с.

Інститут чорної металургії ім.З.І. Некрасова НАН України

Підсистема «ПЮЧ» у вирішенні завдань вибору раціональної технології отримання якісної металопродукції в сировинних і технологічних умовах, що склалися

Анотація. Створення наскрізної технології виробництва конкурентоспроможної металопродукції в сучасних умовах ставить на порядок денний завдання вибору оптимальної схеми технології отримання металу. У вирішенні зазначеної задачі значна роль належить розробці інформаційно-модельоючої системи аналізу та прийняття рішень. Важливою ланкою наскрізної технології є позапічна обробка чавуну. Як показав аналіз різних технологічних рішень з десульфурації чавуну, сьогодні найбільш економічним, раціональним і доцільним є процес, розроблений в Інституті чорної металургії. Процес реалізується шляхом вдування через занурювані фурми диспергированного зернистого магнію без добавок. Використовуються спеціальної системи дозування і інжекції. Розроблений процес пройшов численне промислове випробування на вітчизняних і зарубіжних заводах. Для оптимізації процесу наскрізної технології та її інформаційно-математичного забезпечення розроблені модульні математичні моделі. Створена інтегрована база даних, що узагальнює інформацію про параметри технології десульфурації чавуну зернистим магнієм. Описана і представлена експертна система «Позапічна обробка чавуну», що дозволяє забезпечити отримання високоякісної металопродукції. Вивчено адекватність розробленої моделі для прогнозування питомих витрат магнію при позапічній обробці чавуну. Виконані розробки створили передумови для побудови архітектури Експертної системи прийняття рішень. Поповнення бази даних інформацією поточних та інших технологій десульфурації чавуну дозволить уточнити існуючі та отримати описові моделі для різних реагентів, що послужать основою для алгоритмічного забезпечення аналітичного блоку експертної системи.

Ключові слова: десульфурація, чавун, магній, інформаційна система, модель.

D.N. Togobitskaia, Dr. Sci. (Engin.), Professor, Head of the Department, ORSID 0000-0001-6413-4823

A.S. Vergun, Dr. Sci., (Engin.), Senior Research Scientist, ORSID 0000-0001-5493-9214

L.S. Molchanov, PhD (Engin.), Senior Research Scientist, ORSID 0000-0001-6139-5956

V.G. Kislyakov, PhD (Engin.), Senior Researcher, Head of Department, ORSID 0000-0002-1775-5050

Y.M. Likhachov, Researcher,

N.E. Khodotova, Junior Researcher,

Iron and Steel Institute named after Z.I. Nekrasov of the NAS of Ukraine

«Out-of-furnace cast iron processing» subsystem in the solution of tasks for the choice of rational technology for producing quality metal products under the applicable conditions of raw material and technological.

Summary. The creation of end-to-end technology for the production of competitive metal products in modern conditions puts on the agenda the task of choosing the optimal metal production technology scheme. In solving this problem, a significant role belongs

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2019. – Вип.33

«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33

ISSN 2522-9117 *«Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii». – 2019. – Vypusk 33*

to the development of an information-modeling system for analysis and decision making. An important link in end-to-end technology is the after-furnace treatment of cast iron. As the analysis of various technological solutions for pig iron desulfurization has shown, the process developed at the Institute of Ferrous Metallurgy is currently the most economical, rational and preferred. The process is carried out by blowing through the immersed tuyeres of dispersed granular magnesium without additives. A special dosing and injection system is used. The developed process has undergone numerous industrial testing at domestic and foreign factories. To optimize the process of end-to-end technology and its information-mathematical support, modular mathematical models have been developed. An integrated database has been created that summarizes information on the parameters of cast iron desulfurization technology with granular magnesium. The expert system «Out-of-furnace cast iron processing» is described and presented, which allows to obtain high-quality metal products. The adequacy of the developed model for predicting the specific consumption of magnesium in the after-furnace treatment of cast iron was studied. The completed developments created the prerequisites for building the architecture of the Expert Decision Making System. The replenishment of the database with information on current and other technologies for pig iron desulfurization will make it possible to refine the existing and obtain descriptive models for various reagents, which will serve as the basis for the algorithmic support of the analytical unit of the expert system. **Key words:** desulfurization, hot metal, magnesium, information system, model.

Key words: desulfurization, cast iron, magnesium, information system, model.

For citation: Togobitskaya D.N., Vergun A.S, Molchanov L.S., Kislyakov V.G., Likhachev YU.M., Khodotova N.Ye. *Podсистема «Vnepechnaya obrabotka chuguna» v reshenii zadach vybora ratsional'noy tekhnologii polucheniya kachestvennoy metalloproduksii v slozhivshikhsya syr'yevykh i tekhnologicheskikh usloviyakh.* [Subsystem "Out-of-furnace iron processing" in solving the problems of choosing a rational technology for obtaining high-quality metal products in the current raw material and technological conditions.]. *«Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii»*. [Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy] 2020, 34. 105-115. (In Russian). DOI 10.52150/2522-9117-2019-33-105-115

*Статья поступила в редакцию сборника 25.09.2019 года,
прошла внутреннее и внешнее рецензирование (Протокол заседания
редакционной коллегии сборника №2 от 23 декабря 2019 года)*

А.Г. Чернятевич, д.т.н., проф., зав.отделом, ORCID 0000-0002-4552-4997

Л.С. Молчанов, к.т.н., с.н.с; ORSID 0000-0001-6139-5956

В.В. Вакульчук, к.т.н., н.с., ORSID 0000-0001-7887-2843

П.О. Юшкевич, к.т.н., н.с., ORSID 0000-0002-2675-0737

Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ПОЛОСТИ КИСЛОРОДНОГО КОНВЕРТЕРА ПРИ ПРОДУВКЕ ВАННЫ С ДОЖИГАНИЕМ ОТХОДЯЩИХ ГАЗОВ

Аннотация. Целью исследования является изучение особенностей физико-химических процессов в полости кислородного конвертера при осуществлении продувки ванны через двухъярусные фурмы различной конструкции. Анализ показал, что классические конструкции кислородных фурм, снабженные наконечниками с соплами Лавалия, не всегда удовлетворяют требованиям технологии. В статье приведены результаты лабораторного высокотемпературного моделирования процесса продувки конвертерной ванны через двухъярусные фурмы, оснащенные наконечниками различной конструкции. Исследования проводили на многоцелевой установке, смонтированную на базе 150-кг индукционной печи и 60-кг конвертера, изготовленного в масштабе 1:18 относительно 160-т промышленного агрегата. Показано, что использование двухъярусной фурмы позволяет получить дополнительные преимущества для процесса плавки. Так, в начальный и основной периоды продувки конвертерной ванны через двухъярусную фурму с двухрядным наконечником удалось ускорить процесс шлакообразования без добавок плавикового шпата, интенсифицировать удаление фосфора при высоком содержании углерода. По завершению начального периода продувки при низкой температуре металла 1300-1330°C и соответствующей основности жидкоподвижного шлака, обеспечивается достижение степени дефосфорации 73,3-79,1 %. При использовании для продувки двухъярусных фурм с двухрядными наконечниками увеличивается также эффективность дожигания отходящих газов CO до CO₂ при одинаковой скорости обезуглероживания ванны. На основе данных высокотемпературного моделирования определена рациональная конструкция двухъярусной фурмы, обеспечивающая: сбалансированность теплового баланса; повышение выхода годного; создание условий для удаления фосфора при высоком содержании углерода; исключение негативного воздействия на футеровку.

Ключевые слова: кислородный конвертер, высокотемпературное моделирование, двухъярусная кислородная фурма, процесс плавки, дожигание отходящих газов

Ссылка для цитирования: Чернятевич А.Г., Молчанов Л.С., Вакульчук В.В., Юшкевич П.О., Кобеляцкий А.С. Физико-химические процессы в полости кислородного конвертера при продувке ванны с дожиганием отходящих газов. //«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2019. - Вип.33. – С.116-128. (In Russian). DOI 10.52150/2522-9117-2019-33-116-128

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2019. - Вип.33

«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33

ISSN 2522-9117 «Fundamental'nye i prikladnye problemy čornoj metallurgii». – 2019. – Vypusk 33

Состояние вопроса и постановка задачи исследования. В настоящее время конвертерное производство качественного железоуглеродистого полупродукта связано с повсеместным применением комбинированной продувки обессеренного чугуна кислородом сверху и нейтральным перемешивающим газом через днище. При этом существующие схемы организации производственного цикла предполагают выплавку железоуглеродистого полупродукта в одном или двух конвертерах с разделением процесса на два периода: 1) совместного удаления кремния и фосфора; 2) обезуглероживания и глубокой дефосфорации металлического расплава [1]. Применяемые в данном случае классические конструкции кислородных фурм, снабженные наконечниками с круговым расположением от 4-х до 6-ти сопел Лаваля, формирующих разноимпульсные сверхзвуковые кислородные струи, не удовлетворяют требованиям технологии в отношении улучшения теплового баланса конвертерной плавки, ускорения хода шлакообразования, удаления фосфора при повышенном содержании углерода в металле, предотвращения интенсивного заматалливания ствола фурмы и горловины конвертера, повышения выхода железоуглеродистого полупродукта [2].

В сложившихся условиях актуальной задачей современной металлургической науки является разработка конструкций дутьевых устройств, позволяющих оптимизировать тепловой баланс конвертерной плавки, за счет повышения степени дожигания отходящих газов в полости конвертера, при одновременном исключении указанных негативных аспектов [3]. При этом особенности протекания химических превращений в полости кислородного конвертера являются изученными в недостаточной степени.

Целью данного исследования является изучение особенностей физико-химических процессов в полости кислородного конвертера при осуществлении продувки ванны через двухъярусные фурмы различной конструкции.

Методика проведения исследований физико-химических явлений в полости кислородного конвертера при выплавки стали с частичным дожиганием отходящих газов. Изучение физико-химических явлений, протекающих в полости кислородного конвертера с применением двухъярусных фурм различной конструкции проводилось по средствам высокотемпературного моделирования в лабораторных условиях. С целью получения наиболее полной информации об изменении параметров конвертерной ванны применяли многоцелевую установку, смонтированную на базе 150-кг индукционной печи и 60-кг конвертера,

изготовленного в масштабе 1:18 относительно 160-т промышленного агрегата (рис. 1).

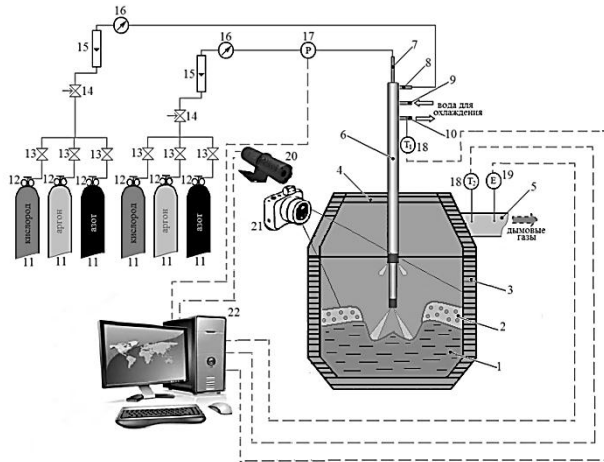


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки для проведения высокотемпературного моделирования: 1- металлическая ванна; 2- шлакометаллическая эмульсия; 3- корпус конвертера; 4- съемная горловина со смотровым окном; 5- дымоотводящий тракт; 6- двухъярусная фурма; 7- патрубок подвода основного кислорода; 8- патрубок подвода дополнительного кислорода; 9,10- патрубки подвода и отвода охлаждающей воды; 11- газовые баллоны; 12- редукторы; 13- отсечные вентили; 14- регулирующие вентили; 15- ротаметры; 16- манометры аналоговые; 17- манометр цифровой; 18- термопары; 19- датчик выброса пыли ДВП-02; 20- пирометр; 21- видеокамера; 22- компьютер.

Процесс проведения исследований продувки конвертерной ванны сопровождался фиксацией параметров ванны (температура и химический состав) с интервалом 3 – 5 мин., а также высокоскоростной видеосъемкой (300 кадров/с), осуществляемой при помощи видеокамеры *Kasio exkelisx – 101*.

Для высокотемпературного моделирования применяли перedefельный жидкий чугун известного состава (в среднем 4,15%С, 0,32%Mn, 0,55%Si, 0,034%S и 0,095%P) с температурой 1350-1450°C, который расплавля в кислоте тигле индукционной печи. После отбора пробы чугуна и заливки в конвертер начинали продувку с использованием двухъярусных кислородных фурм (рис. 2, табл. 1), снабженных независимо регулируемые подводами к ним основного $Q_{O_2}^{осн}$ и дополнительного $Q_{O_2}^{доп}$ потоков кислорода с расходами в пределах 2,0-3,3 и 0,18-1,65 м³/т·мин соответственно через группы сопел Лавалья и цилиндрических. Высоту

фурмы над уровнем ванны в спокойном состоянии изменяли в пределах 20-60 калибров.

Таблица 1 – Конструктивные параметры двухъярусных фурм

Параметры	Номера фурм			
	№1 (рис.2,б)	№2 (рис. 2,б)	№3 (рис. 2,б)	№4 (рис. 2,г)
Наконечник				
Число сопел Лавалья / цилиндрических, шт.	4/-	4/-	4/8	4/8
Угол наклона к вертикали фурмы, град сопел Лавалья (α_1) / цилиндрических (α_2)	15/-	12/-	12/30	12/30
Критический ($d_{кр}$) / выходной ($d_{вых}$) диаметр сопла Лавалья, мм	1,7/2,5	1,7/2,5	1,7/2,5	1,7/2,5
Диаметр цилиндрических сопел ($d_{ц}$), мм	-	-	1,0	1,0
Верхний сопловый блок				
Число цилиндрических сопел, шт.	8	8	8	8
Угол наклона к вертикали (α_3), град	45	30	30	30
Диаметр сопел, мм	1,0	1,0	1,0	1,0
Расстояние верхнего соплового блока от торца наконечника ($H_я$), мм	105	105	105	105

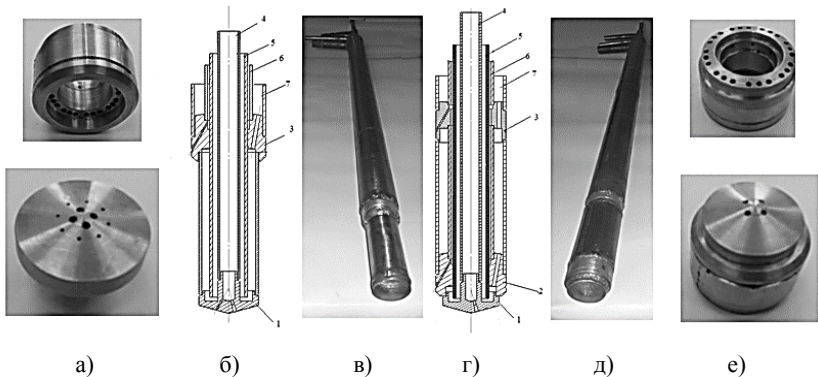


Рисунок. 2 - Схема и вид элементов конструкций двухъярусных фурм с подводом дополнительного кислорода только к цилиндрическим соплам верхнего соплового блока (а, б, в), одновременно к цилиндрическим соплам верхнего блока и наконечника (г, д, е): 1- обычный 12-ти сопловый двухрядный наконечник (а); 2-

составной 12-ти сопловый двухрядный наконечник (г); 3- 8-ми сопловый верхний сопловый блок; 4- труба подвода основного кислорода; 5- труба подвода воды; 6- труба подвода дополнительного кислорода; 7 – труба отвода воды

Для наведения шлака рассредоточено присаживали доломитизированную известь, плавиковый шпат и железорудные окатыши фракцией 8-12 мм в количестве 1,5-2,5, 0,2-0,3 и 0,1-0,2 кг соответственно.

С целью изыскания дополнительных управляющих воздействий на состояние вспененной шлакометаллической эмульсии в конвертере в определенные периоды продувки производили замену дополнительного кислорода на азот с расходом 0,18-2,05 м³/т·мин.

Основные результаты высокотемпературного моделирования.

Важнейшими факторами технологии продувки конвертерной ванны с дожиганием отходящих газов (рис. 3) являются:

- выбор кислородной фурмы с оптимальной конструкцией наконечника и верхнего соплового блока;
- разработка дутьевого и шлакового режимов продувки, совмещенного с процессом частичного дожигания отходящих газов, обеспечивающего ускоренное шлакообразование и окисление фосфора с предотвращением локального износа футеровки, интенсивного заметалливания фурмы и горловины конвертера.

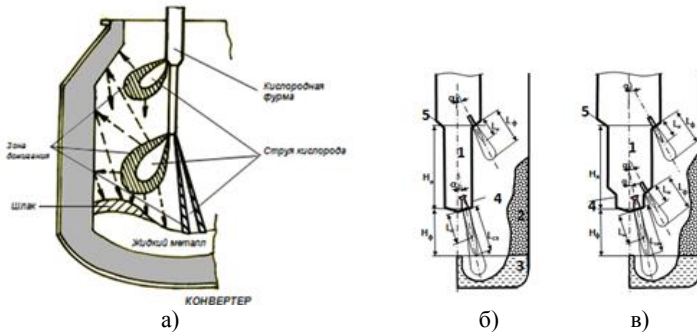


Рисунок 3 - Схема организации продувки конвертерной ванны с дожиганием отходящих газов (а) при использовании обычной двухъярусной (б), двухъярусной с двухрядным наконечником (в) фурм: 1 – фурма; 2 – шлак; 3 – металл; 4 – наконечник; 5 – верхний сопловый блок

При применении двухъярусных кислородных фурм (табл. 1) с началом продувки ванны 60-кг конвертера с расходом основного кислорода 0,20 м³/мин (3,33 м³/т·мин) устойчивое «зажигание» плавки наблюдалось при расположении торца наконечника на начальной высоте (

$H_{\phi}^{\text{нач}}$) 45-50 калибров. С установлением двухъярусной фурмы (№ 1, табл. 1) на рабочей высоте ($H_{\phi}^{\text{раб}}$) 30 калибров и расходе основного кислорода 0,20 м³/мин через 4 сопла Лаваля обеспечивалась продувка в режиме глубокого проникновения сверхзвуковых кислородных струй в расплав с формированием в глубине последних обособленных реакционных зон.

Из пределов этих реакционных зон, в случае расположения уровня вспененной шлакометаллической эмульсии вблизи торца наконечника фурмы, происходит периодический выход на поверхность ванны объемов СО в виде макропузырей. При этом в формировании факелов дожигания СО до СО₂ принимают участие только струи дополнительного кислорода, расположенные на стороне выхода макропузыря, остальные же струи внедряются во вспененный шлак и взаимодействуют с последним (рис. 4). С повышением скорости обезуглероживания в основной период продувки, а соответственно с увеличением объема выделяемого из пределов реакционной зоны монооксида углерода, возрастает по диаметру околофурменная область выхода на поверхность ванны СО. Это способствует при расходе дополнительного кислорода 0,084-0,13 м³/мин (1,4 – 2,16 м³/(т·мин)) интенсивному развитию дожигания вовлеченного в звуковые струи СО до СО₂ с формированием высокотемпературных факелов, воздействующих на поверхность ванны за пределами зон непосредственного взаимодействия сверхзвуковых кислородных струй с расплавом (рис. 5).

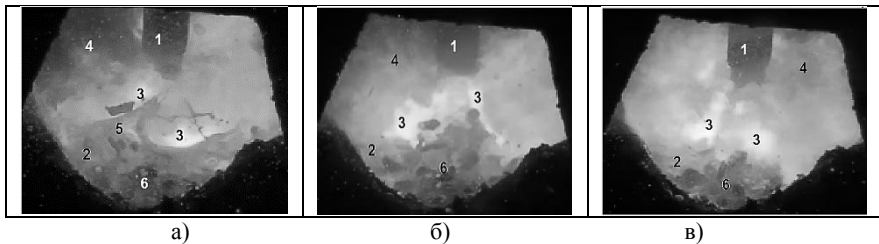


Рисунок. 4 - Картина продувки конвертерной ванны с использованием двухъярусной фурмы № 1 (табл. 1) при параметрах дутья: $Q_{O_2}^{\text{осн}} = 0,20 \text{ м}^3/\text{мин}$ (3,33 м³/(т·мин)); $Q_{O_2}^{\text{доп}} = 0,12 \text{ м}^3/\text{мин}$ (2,0 м³/(т·мин)); $H_{\phi}^{\text{раб}} = 30$ калибров; 1 - двухъярусная фурма; 2 - поверхность шлака; 3 – факела дожигания СО; 4 – выход бурого дыма; 5 – всплески шлака; 6 – кусочки присаженной извести.

Зафиксированная в результате обработки кадров видеосъемки (рис. 4, 5) длина факелов горения, натекающих на поверхность ванны, составляет 90-100 калибров.

При уровне вспененной шлакометаллической эмульсии, располагающейся вблизи (рис. 6) или над верхним ярусом (рис. 7) цилиндрических сопел продувка обычно протекает в режиме, когда с определенной частотой из пределов реакционной зоны выходит цепочка всплывающих вдоль ствола фурмы макропузырей CO , которые в процессе всплывания и укрупнения вызывают первоначальное увеличение высоты слоя вспененного шлака и последующее снижение после выхода и разрушения очередного макропузыря на поверхности ванны в околоручной зоне.

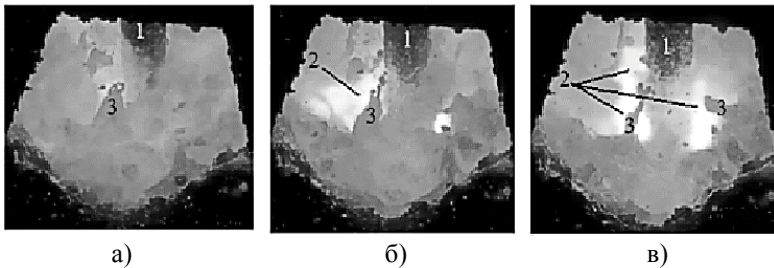


Рисунок 5 - Картина продувки конвертерной ванны через двухъярусную фурму (№2, табл. 2) в период интенсивного окисления углерода ($H_{\phi}^{\text{раб}}=30$ калибров, $Q_{\text{O}_2}^{\text{осн}}=0,20 \text{ м}^3/\text{мин}$ ($3,33 \text{ м}^3/(\text{т} \cdot \text{мин})$), $Q_{\text{O}_2}^{\text{доп}}=0,10 \text{ м}^3/\text{мин}$ ($1,66 \text{ м}^3/(\text{т} \cdot \text{мин})$): 1- фурма; 2- факела дожигания; 3- всплески шлака

Высокотемпературные продукты реакции дожигания CO до CO_2 передают тепло окружающей макропузырь оболочке шлакометаллической эмульсии, которая в перегретом до более высокой температуры состоянии выносится на поверхность ванны (рис. 7), принимая участие в процессе передачи тепла от дожигания через шлак к присаженной кусковой извести и металлической ванне. Теплопередача от факела дожигания осуществляется по закономерностям погружного горения, завершается в шлаковом слое и не вызывает дополнительного нагрева футеровки.

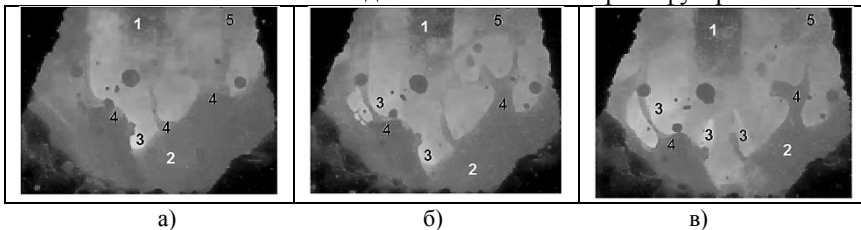
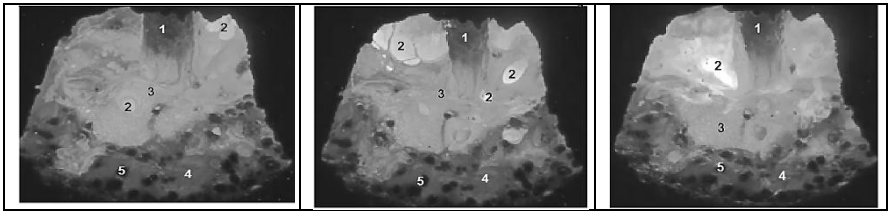


Рисунок 6 - Картина продувки конвертерной ванны через двухъярусную фурму (№3, табл. 1) в период интенсивного окисления углерода ($H_{\phi}^{\text{раб}}=30$ калибров, $Q_{\text{O}_2}^{\text{осн}}$

$=0,20 \text{ м}^3/\text{мин}$ ($3,33 \text{ м}^3/(\text{г} \cdot \text{мин})$), $Q_{\text{O}_2}^{\text{доп}} = 0,13 \text{ м}^3/\text{мин}$ ($2,17 \text{ м}^3/(\text{г} \cdot \text{мин})$): 1- двухъярусная фурма; 2- поверхность шлака; 3- факела дожигания CO; 4- всплески шлака; 5- выход бурого дыма



а)

б)

в)

Рисунок 7 - Картина продувки конвертерной ванны с использованием двухъярусной фурмы (№ 4, табл. 1) в период наводки шлака при параметрах дутья: 1 - двухъярусная фурма; 2 – выход CO; 3 – околофурменный перегретый объем шлака; 4 – периферийный шлаковый объем; 5 – кусочки присаженной извести

В начальный и основной периоды продувки конвертерной ванны через двухъярусную фурму с двухрядным наконечником (№ 3, табл. 1) удалось ускорить процесс шлакообразования без добавок плавикового шпата, интенсифицировать удаление фосфора при высоком содержании углерода путем:

- расположения в ходе продувки двухъярусной фурмы на начальной ($H_{\phi}^{\text{нач}}$) и рабочей ($H_{\phi}^{\text{раб}}$) высоте, определяемой из уравнений [4]:

$$\frac{H_{\phi}^{\text{нач}}}{d_{\text{кр}}} = 63,1 \left(\sum i_{\text{O}_2}^{\text{осн}} / mg \right)^{0,094} (1),$$

$$\frac{H_{\phi}^{\text{раб}}}{d_{\text{кр}}} = 40,8 \left(\sum i_{\text{O}_2}^{\text{осн}} / mg \right)^{0,092} (2),$$

где $\sum i_{\text{O}_2}^{\text{осн}}$ – суммарный импульс основных сверхзвуковых кислородных струй, воздействующих на ванну, $\text{кг} \cdot \text{м}/\text{с}^2$; m – масса жидкого металла, кг ; g – ускорение силы тяжести, $\text{м}/\text{с}^2$; $d_{\text{вых}}$ – критический диаметр сопла Лаваля;

- распределения общего потока кислорода на основной ($Q_{\text{O}_2}^{\text{осн}} = Q_{\text{O}_2}^{\text{л,н}} + Q_{\text{O}_2}^{\text{н,н}}$), ддуваемый в полость конвертера через сопла Лаваля ($Q_{\text{O}_2}^{\text{л,н}}$) и цилиндрические ($Q_{\text{O}_2}^{\text{н,н}}$) наконечника, и дополнительный ($Q_{\text{O}_2}^{\text{доп}} = Q_{\text{O}_2}^{\text{н,я}}$), подаваемый через верхний ярус цилиндрических сопел, в процентном соотношении 78:12:10.

При таком режиме дутья (рис. 8) по завершению начального периода продувки при низкой температуре металла 1300-1330°C и основности жидкоподвижного шлака $\text{CaO}/\text{SiO}_2=1,9-2,1$, содержащего 23,7-24,2 % FeO и 4,0-4,2 % MgO, обеспечивается удаление фосфора с начального содержания в чугуне 0,09-0,12 % до 0,024-0,025 % по завершению начального периода продувки с достижением степени дефосфорации 73,3-79,1 %.

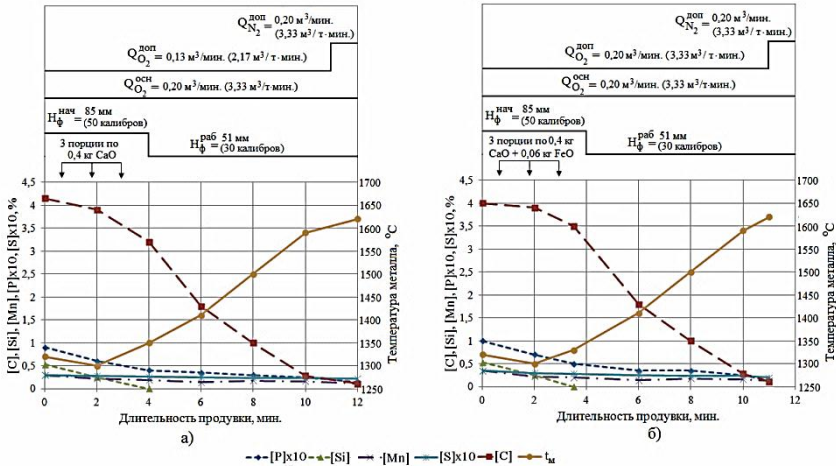


Рисунок 8 – Изменение химического состава и температуры металла в ходе продувки с использованием двухъярусной фурмы № 3 (а) и № 4 (б) при отработанных параметрах дутья и присадки шлакообразующих материалов

По окончании продувки ванны концентрация углерода и фосфора в металле составляла 0,09-0,10 % и 0,015- 0,017 % соответственно. При равной скорости обезуглероживания ванны эффективность дожигания CO до CO₂ увеличивается в случае использования для продувки конвертерной ванны двухъярусных фурм с двухрядными наконечниками (№№ 3, 4), поскольку их конструкции из-за размещения сопел Лавалья в наконечнике под углом 12° к вертикали, обеспечивает формирование мощного «свищевого» потока CO, выходящего из пределов общей реакционной зоны ассиметрично вдоль ствола фурмы. При этом повышение эффективности дожигания CO до CO₂ во вспененном шлаке достигается путем формирования встречно направленной двойной завесы звуковых кислородных струй с локализацией дожигания в пределах околосурменного «свищевого» потока и предотвращением агрессивного воздействия факелов дожигания и переоxygenного шлака на футеровку конвертера. Одновременно обеспечивается снижение интенсивности

выноса капель металла и шлака в направлении ствола фурмы и горловины конвертера, что приводит к снижению интенсивности заметалливания горловины конвертера и ствола фурмы.

С учетом скачивания части шлака после завершения начального периода плавки в период основного окисления углерода представляется возможным организовать продувку по малошлаковой технологии с меньшим количеством присаженной извести.

Важным является то, что с использованием двухъярусных фурм (№№ 3, 4) появляются дополнительные управляющие воздействия на процесс рафинирования, которые позволяют проводить дефосфорицию расплава при более низких температурах металла с дальнейшим повышением температуры ванны за счет дополнительного прихода тепла в результате дожигания СО до СО₂ во вспененной шлакометаллической эмульсии. Замена дополнительного кислорода на азот на завершающей стадии продувки обеспечивает (рис. 8) эффективное снижение уровня вспененной шлакометаллической эмульсии перед повалкой конвертера, что сопровождается снижением потери металла в виде корольков со скачиваемым шлаком, сокращением продолжительности замера температуры ванны, отбора проб металла и шлака.

Основные выводы. Освещены результаты лабораторного высокотемпературного моделирования продувки конвертерной ванны через двухъярусные фурмы, оснащенные наконечниками различной конструкции.

На основе данных высокотемпературного моделирования определена рациональная конструкция двухъярусной фурмы, обеспечивающей сбалансированность теплового баланса, повышения выхода годного, создания условий для удаления фосфора при высоком содержании углерода и исключения негативного воздействия на футеровку.

Библиографический список

1. Чернятевич А.Г., Вакульчук В.В. О повышении эффективности верхней продувки конвертерной ванны // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: Сб. научн. тр.- Днепропетровск: ИЧМ.-2015.- Вып.30.- С. 130-147.
2. Чернятевич А.Г., Молчанов Л.С., Юшкевич П.О. Направления повышения эффективности продувки ванны 160-т конвертеров ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» // Теория и практика металлургии. – №3– 4 (110–111). – 2017. – С.66–74.
3. Чернятевич А.Г. Направления совершенствования конструкций кислородных фурм в конвертерных цехах Украины / А.Г. Чернятевич, А.В. Сущенко, «Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2019. - Вып.33 «Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33 ISSN 2522-9117 «Fundamental'nye i prikladnye problemy čornoj metallurgii». – 2019. – Vypusk 33

В.В. Вакульчук, П.О. Юшкевич // Бюллетень «Черная металлургия». - 2015.- № 3.- С. 52-65.

4. Чернятевич А.Г. Високотемпературное моделирование продувки конвертерной ванны с использованием двухъярусной кислородной фурмы / А.Г. Чернятевич, В.В. Вакульчук, Л.С. Молчанов, П.О. Юшкевич, Е.Н. Сигарев, К.И. Чубин, Е.А. Чубина // Теория и практика металлургии. – 2017. – №3–4 (110–111). – С.79–85.

Refer ence

1. Chernyatevich A.G., & Vakul'chuk V.V. (2015). O povyshenii effektivnosti verkhney produvki konvertvernoy vannы [On increasing the efficiency of the upper blowing of the converter bath]. *Fundamental'nyye i prikladnyye problemy chernoy metallurgii: Sb.nauchn.tr. [Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy. Collection of scientific articles]*, 2015, 30, 130-147. (In Russian).
2. Chernyatevich A.G., Molchanov L.S. & Yushkevich P.O. (2017). Napravleniya povysheniya effektivnosti produvki vannы 160-t konverterov PAO «ArcelorMittal Krivoy Rog» [Directions for increasing the efficiency of bath blowing of 160-ton converters of PJSC "ArcelorMittal Kryvyi Rih"]. *Teoriya i praktika metallurgii [Theory and Practice of Metallurgy]*, 2017, 3–4 (110–111), 66–74. (In Russian).
3. Chernyatevich A.G., Sushchenko A.V., Vakul'chuk V.V. & Yushkevich P.O. (2015). Napravleniya sovershenstvovaniya konstruktsey kislorodnykh furn v konvertornykh tsekhakh Ukrainy [Directions for improving the designs of oxygen tuyeres in converter shops in Ukraine]. *Byulleten' Chernaya metallurgiya [Ferrous Metallurgy. Bulletin]*, 2015, 3, 52-65. (In Russian).
4. Chernyatevich A.G., Vakul'chuk V.V., Molchanov L.S., Yushkevich P.O., Sigarev Ye.N. & Chubin K.I. et al. (2017). Vysokotemperaturnoye modelirovaniye produvki konvertvernoy vannы s ispol'zovaniyem dvukh'yarusnoy kislorodnoy furnы [High-Temperature Simulation of Converter Bath Purge Using a Double Deck Oxygen Lance]. *Teoriya i praktika metallurgii [Theory and Practice of Metallurgy]*, 2017, 3–4 (110–111), 79–85. (In Russian).

А.Г. Чернятевич, д.т.н., проф., зав.відділом, ORCID 0000-0002-4552-4997

Л.С. Молчанов, к.т.н., с.н.с., ; ORSID 0000-0001-6139-5956

В.В. Вакульчук, к.т.н., с.н.с., ORSID 0000-0001-7887-2843

П.О. Юшкевич, к.т.н., с.н.с., ORSID 0000-0002-2675-0737

Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины

Фізико-хімічні процеси в порожнині кисневого конвертера під час продування ванни з допалювання газів

Анотація. Метою дослідження є вивчення особливостей фізико-хімічних процесів у порожнині кисневого конвертера при здійсненні продувки ванни через двоярусні фурми різної конструкції. Аналіз показав, що класичні конструкції кисневих фурм, оснащені наконечниками з соплами Лавалля, не завжди задовольняють вимогам технології. У статті наведено результати лабораторного високотемпературного моделювання процесу продувки конвертерної ванни через

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2019. - Вип.33

«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33

ISSN 2522-9117 *«Fundamental'nyye i prikladnyye problemy černoј metallurgii». – 2019. – Vypusk 33*

двох'ярусні фурми, оснащені наконечниками різної конструкції. Дослідження проводили на багатоцільовий установці, що змонтована на базі 150-кг індукційної печі та 60-кг конвертера, виготовленого в масштабі 1:18 щодо 160-т промислового агрегату. Показано, що використання двох'ярусної фурми дозволяє отримати додаткові переваги для процесу плавки. Так, в початковий і основний періоди продувки конвертерної ванни через двох'ярусну фурму з дворядним наконечником вдалося прискорити процес шлакоутворення без добавок плавикового шпату, інтенсифікувати видалення фосфору при високому вмісті вуглецю. По завершенню початкового періоду продувки при низькій температурі металу 1300-1330°C і відповідній основності шлаку, забезпечується досягнення ступеня дефосфорації 73,3-79,1%. При використанні для продувки двох'ярусних фурм з дворядними наконечниками збільшується також ефективність допалювання газів CO до CO₂ при однаковій швидкості зневуглицювання ванни. На основі даних високотемпературного моделювання визначено раціональну конструкцію двох'ярусної фурми, що забезпечує: збалансованість теплового балансу; підвищення виходу придатного; створення умов для видалення фосфору при високому вмісті вуглецю; виключення негативного впливу на футеровку.

Ключові слова: кисневий конвертер, високотемпературне моделювання, двох'ярусна киснева фурма, процес плавки, допалювання газів

A.G. Chernyatevich, Dr. Sci., professor, Head of Department, ORCID 0000-0002-4552-4997

L.S. Molchanov, PhD, Senior Researcher, ORSID 0000-0001-6139-5956

V.V. Vakulchuk, PhD, Senior Researcher, ORSID 0000-0001-7887-2843

B.Y. Yushkevich, PhD, Senior Researcher, ORSID 0000-0002-2675-0737

Iron and Steel Institute named after Z.I. Nekrasov of the NAS of Ukraine

Physical and chemical processes in the cavity of the oxygen converter when burning the bath with the afterburning of exhaust gases

Summary. The aim of the study is to study the characteristics of physicochemical processes in the cavity of an oxygen converter when purging a bath through two-tier tuyeres of various designs. The analysis showed that the classical designs of oxygen tuyeres equipped with tips with Laval nozzles do not always satisfy the requirements of the technology. The article presents the results of laboratory high-temperature modeling of the process of purging the converter bath through two-tier tuyeres equipped with tips of various designs. The studies were carried out on a multipurpose installation mounted on the basis of a 150-kg induction furnace and a 60-kg converter manufactured at a scale of 1:18 relative to 160 tons of an industrial unit. It is shown that the use of a two-tier lance provides additional advantages for the smelting process. So, in the initial and main periods of purging the converter bath through a two-tier lance with a double-row tip, it was possible to accelerate the process of slag formation without the addition of fluorspar, to intensify the removal of phosphorus at a high carbon content. Upon completion of the initial purge period at a low metal temperature of 1300-1330 °C and the corresponding basicity of liquid slag, the degree of dephosphorization of 73.3-79.1% is achieved. When used for blowing two-tier tuyeres with double-row tips, the efficiency of afterburning of CO exhaust gases to CO₂ also increases at the same decarburization

rate of the bath. Based on the data of high-temperature modeling, the rational design of the two-tier lance has been determined, which ensures: balance of the heat balance; yield increase; creating conditions for the removal of phosphorus at a high carbon content; exclusion of negative effects on the lining.

Keywords: oxygen converter, high-temperature modeling, two-level oxygen lance, melting process, exhaust gas afterburning

For citation: Chernyatevich A.G., Molchanov .S., Vakul'chuk .V., Yushkevich P.O., Kobelyatskiy A.S. Fiziko-khimicheskiye protsessy v polosti kislородного konvertera pri produvke vannы s dozhiganiyem otkhodyashchikh gazov. [Physicochemical processes in the oxygen converter cavity during bath purging with afterburning of exhaust gases.]. *«Fundamental'nye i prikladnye problemy čerной metallurgii»*. [Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy] 2020, 34. 116-128. (In Russian). DOI 10.52150/2522-9117-2019-33-116-128

*Статья поступила в редакцию сборника 19.10.2019 года,
прошла внутреннее и внешнее рецензирование
(Протокол заседания редакционной коллегии сборника №2 от 23 декабря 2019 г.*

В.П.Пиптюк, к.т.н., с.н.с, ORCID 0000-0002-2915-1756

А.С.Вергун, д.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0001-5493-9214

С.В.Греков, н.с., ORCID 0000-0003-2848-0999

Институт чёрной металлургии им. З.И.Некрасова НАН Украины

С.Е.Самохвалов, д.т.н., зав. каф., проф., ORCID 0000-0002-7362-213X

К.С.Красников, к.т.н., ст. преп., ORCID 0000-0002-4241-0572

Днепропетровский государственный технический университет

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РЕГЛАМЕНТА НАУГЛЕРОЖИВАНИЯ ЧУГУНА В 30-т КОВШЕ. ЧАСТЬ 1

Аннотация. Представлены результаты численного моделирования процесса науглероживания чугуна с низким содержанием углерода, как попутного продукта производства титанового шлака, для проектируемой установки ковш-печь (УКП) применительно к условиям ПАО «Запорожский титаномагний комбинат». Разработан технологический регламент и проведено численное исследование по науглероживанию металла в 30-т ковше на УКП. Для производства товарного чушкового чугуна используются попутные железосодержащие отходы. Цель работы - выявление факторов влияния внепечной обработки на оптимизацию технологии. Выполнено численное моделирование технология науглероживания жидкого низкоуглеродистого (до 2% углерода) чугуна кусковыми (фракция до 50 мм) графитом и коксиком, вводимых на поверхность ковшовой ванны (без учёта шлакового покрова). Проведены материальный и энергетический балансы процесса, изучены свойства науглероживающих материалов, оценён коэффициент диффузии углерода в жидком металле. Результаты исследований гидродинамических и тепловых условий в ковшовой ванне УКП оценены по контурным диаграммам скорости потоков и температурных полей для разных расходов аргона, подаваемого через донную и погружаемую фурмы. Определены оптимальные фракции содержащих углерод материалов. Показано, что обработка на УКП кусковым графитом требует меньшей продолжительности ($\approx$ на 45 %) по сравнению с кусковым коксиком. Для ускорения процесса диффузионного растворения углерода необходимо периодически (через каждые 3 порции по 70 кг графита и коксика) нагревать расплав до температуры 1520-1530⁰С. Более эффективному усвоению углерода и уменьшению продолжительности процесса ($\approx$ на 1/3) способствует инжекционный ввод порошкообразных графита и коксика. Исследования продолжаются в направлении использования порошковой проволоки для науглероживающей обработки чугуна на УКП.

Ключевые слова: Графит, коксик, науглероживание чугуна, установка ковш-печь

Ссылка для цитирования: Пиптюк В.П., Самохвалов С.Е., Вергун А.С., Греков С.В., Красников К.С. Разработка технологического регламента науглероживания чугуна в 30-т ковше. Часть 1. // «Фундаментальні та прикладні

Современное состояние вопроса. Одной из основных задач на стадии разработки технологического регламента производства металлургической продукции является создание ресурсо- и энергосберегающего процесса, обеспечивающего высокое качество и потребительские свойства на современном комплексе оборудования.

Перед ПАО «Запорожский титаномагний комбинат» (ПАО «ЗТМК») возникла проблема утилизации отходов производства титановых шлаков. С этой целью принято решение строительства линии по производству товарного чугуна из отходов - попутного железосодержащего продукта. Проектирование такой технологической линии выполняло ООО «Титанпроект» (г. Запорожье), по заданию которого сотрудниками ИЧМ НАНУ разработан технологический регламент и описан комплекс необходимого оборудования [1].

Проектируемая технологическая линия должна включать следующие основные участки: выпечной доводки чугуна, его десульфурации, разливки чугуна и подготовительный. Главной задачей участка выпечной доводки чугуна является корректировка его химического состава и температуры. В зависимости от производимой марки чушкового чугуна производится науглероживание попутного железосодержащего продукта рудотермической печи на установке ковш-печь (УКП). В металлургической практике корректировка металла по химическому составу обычно производится не более чем на 0,1-0,2 %. Для производства товарного чугуна необходимо науглероживание на 1-2,5 % в зависимости от исходного содержания углерода в чугуне.

Добавка науглероживающих материалов сопровождается значительным охлаждением металла из-за эндотермического характера процесса их растворения. В связи с этим корректировка чугуна по температуре требует увеличения продолжительности нагрева расплава на УКП, что негативно скажется на стойкости футеровки ковша, повысит расход электроэнергии и износ металлургического оборудования.

Поэтому при проектировании комплекса оборудования и разработке технологического регламента потребовалось предварительно численно исследовать процесс науглероживания.

Цель работы. Проведение численных исследований обработки низкоуглеродистого чугуна на УКП с целью доводки его химического состава до нормативных требований для чушкового передельного или литейного чугуна, а также выявление и оценка технологических факторов по управлению процессом выпечной обработки чугуна.

Исходные данные и методика исследований. Исходным материалом для численных исследований являлось техническое задание, а также проектируемое технологическое оборудование с соответствующими характеристиками.

В качестве объекта исследований рассматривалась металлическая ковшовая ванна УКП, аналогичная той, которая должна быть использована на ПАО «ЗТМК». Габариты ванны: верхний диаметр 1,912 м, нижний диаметр 1,892 м, высота – 1,7м. Ёмкость ванны по металлу – 30 т. Совмещённая схема крышки УКП и днища ванны показана на рис. 1



Для модуля нагрева расчётом определена активная мощность трансформатора – 8,4МВт. В численных исследованиях принималось, что тепловые потери в металлической ванне составляли 4°С/мин. Начальная температура нагрева металла принималась 1380°С.

Начальное содержание углерода в железосодержащем продукте - 2% [2].

В качестве науглероживающих материалов-добавок в настоящем исследовании использовали бой графитовых электродов и коксик. Теплофизические свойства науглероживающих добавок и чугуна представлены в табл. 1.

На первом этапе изучили гидродинамическое и тепловое состояния металлической ванны со следующими расходами аргона (л/мин) через донную фурму (ДФ): 0,08М; 0,16М; 0,25М; 0,33М, 0,41М; 0,50М; 1,0М, где М – максимальное в данном исследовании значение величины расхода аргона. На втором этапе изучили продолжительность растворения графита и коксика при вводе в ковш в кусковом виде и методом инжестирования порошкообразных частиц в потоке аргона для производства чушкового

чугуна с содержанием 4,2%[C]. Для этого предварительно оценили коэффициент диффузии углерода.

Таблица 1. Теплофизические свойства науглероживающих материалов-добавок и чугуна [3]

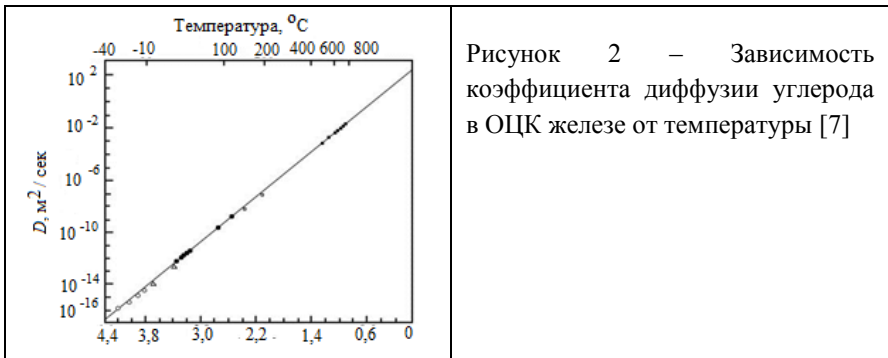
Материал	Температура солидус, К	Плотность, кг/м ³	Теплоёмкость, Дж/кг	Теплопроводность, Вт/(м*К)	Теплота фазовых превращений, Дж/кг
Графит	2873	2100	1200	25	1810000
Кокс	2873	1900	800	2	1400000
Чугун (2%С) твёрдый	1436	7000	837	20	276000
Чугун (2%С) жидкий	1673	7000	837	25	-

Нагрев металла до температуры 1530°C производили электрической дугой. Порции кусков добавки (фракция 5мм в поперечнике) двух видов принимали массой 70кг. Фиксировали продолжительность плавления намёрзшей корочки, продолжительность растворения добавки, продолжительность гомогенизации до коэффициента вариации по углероду 2%, содержание углерода в чугуне и его температуру. Для каждой порции углеродосодержащей добавки рассчитывали иной коэффициент диффузии углерода и температурные условия её усвоения. После ввода нескольких порций (охлаждение чугуна не ниже 1420°C), нагревали расплав до ≈1530°C. Применительно к кусковым добавкам расход аргона через ДФ составлял 0,25М.

При инжектировании монодисперсных частиц углеродосодержащих материалов (фракция 0,2 мм и 0,1 мм) расход аргона через ПФ составлял – 1,0М, а через ДФ 0,16М или 0,33М при условиях, аналогичных вводу кусковых материалов. После установления квазистационарного гидродинамического режима перемешивания расплава осуществляли продувку через ПФ в течении 60с, а затем с интенсивностью 1 кг/с производили подачу порошкообразного материала. После его ввода осуществляли продувку расплава ещё в течении 60с. Масса порций для графита и коксика составляла до 270 и 315кг соответственно.

На заключительном этапе сопоставляли экспериментальные данные по продолжительности растворения в чугуне графита и коксика, полученные методом горячего физического моделирования, с соответствующими расчётными значениями.

Изложение основных материалов исследования. Оценки диффузионных характеристик углерода в железосодержащих расплавах проводили с учётом литературных данных. Установили, что диффузионные характеристики для одних и тех же условий разнятся на несколько порядков [4] и [5], а коэффициенты диффузии имеют значения $D [C] = 7,9 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$ и $2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ соответственно., а согласно [6] его величина равна $1,57 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$.



Авторы [8] приводят экспериментальные данные коэффициентов диффузии углерода в жидких железе, никеле и кобальте при различных температурах и содержаниях углерода и др. элементов в расплавах. С использованием этих данных произвели статистическую обработку и получили уравнение коэффициента диффузии, которое и использовали в данном численном исследовании. Полученное уравнение имеет следующий вид:

$$D[C] = 1.355 \cdot 10^{-9} \times e^{(0.3915 \cdot [\%C] - \frac{10837}{RT})}, \quad (1)$$

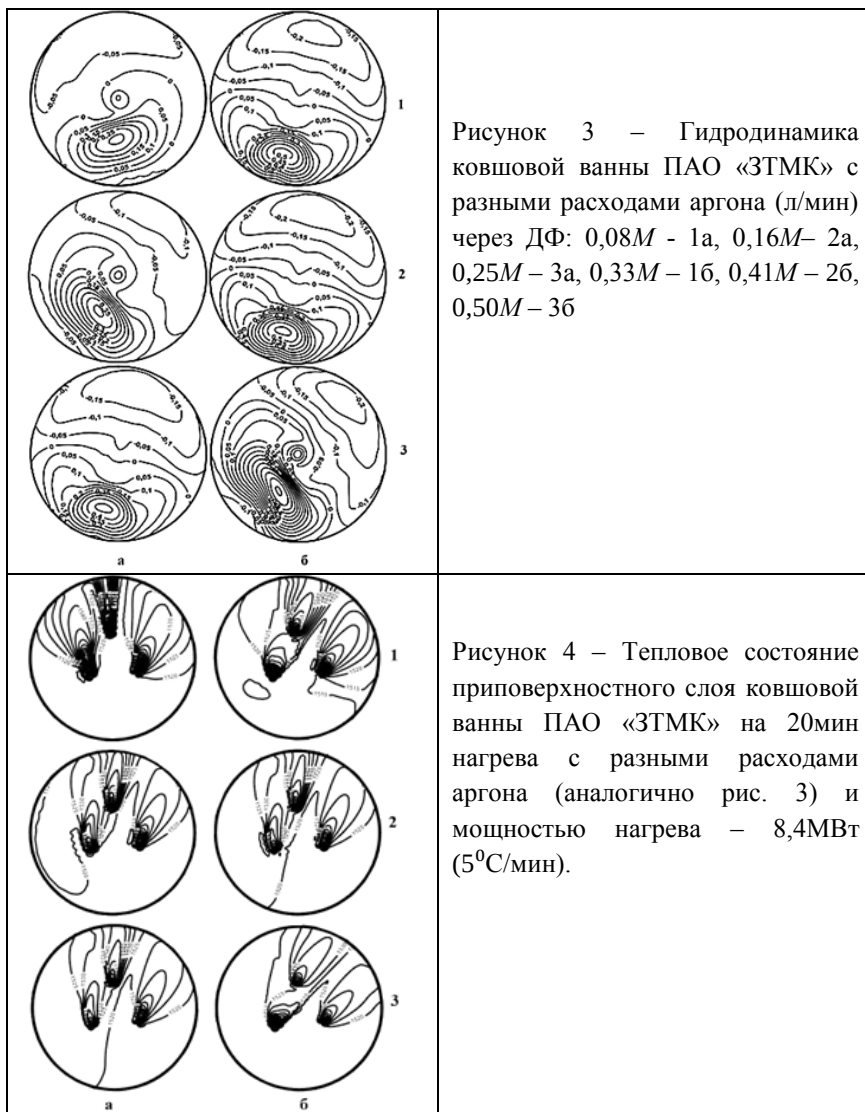
где $[\%C]$ – содержание углерода в чугуна

R – универсальная газовая постоянная

T – температура чугуна (K)

При помощи программы “Gidrodinamika”, разработанной сотрудниками ДГТУ, на основе математических моделей массопереноса (далее по тексту - массо- и теплообмена) оценивали гидродинамическое состояние металлической ванны по контурным диаграммам усреднённой по высоте вертикальной составляющей скорости расплава (рис.3). Как для ковшей большой и средней ёмкости, так и для ковшей малой ёмкости подтверждено возрастание экстремальных значений вертикальной составляющей скорости с ростом интенсивности донной продувки [9-14].

Тепловое состояние металлической ванны также оценивали по контурным диаграммам (рис. 4), на которых показаны изотермы приповерхностного слоя чугуна. Такой выбор связан с тем, что именно в этом слое происходит плавление (растворение) легковесных ферросплавов и науглероживающих материалов.

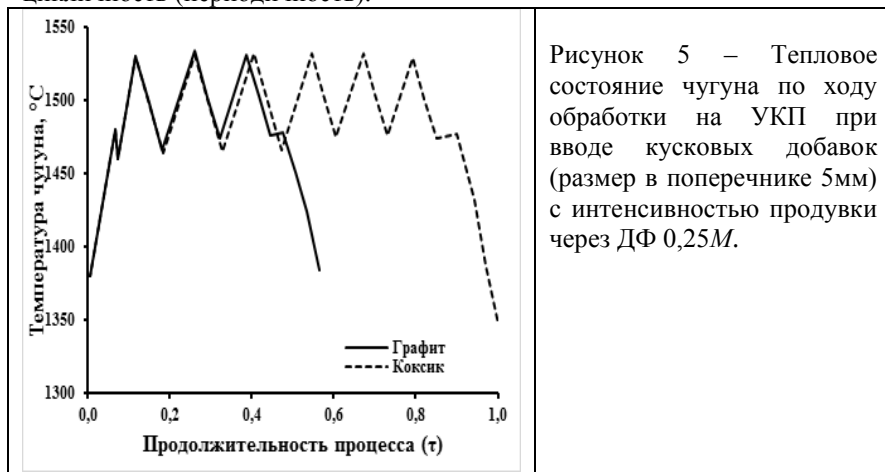


Установлено, что с ростом интенсивности продувки через ДФ наблюдалась тенденция постепенного снижения максимальной температуры (в местах воздействия электрических дуг) в приповерхностном слое расплава. При этом минимальная температура в этом слое практически не изменялась. Это явление, вероятно, можно объяснить возрастанием мощности перемешивания с ростом интенсивности продувки при постоянных тепловых стоках, которые обеспечивают охлаждение чугуна у стенок с большей скоростью, чем при принудительных конвективных потоках. Следует отметить, что с ростом интенсивности продувки расплава после отключения модуля нагрева происходит уменьшение продолжительности его гомогенизации по температуре как в объеме, так и в отдельных слоях ковшовой ванны (например, в приповерхностном слое градиент температур металла сначала перед отключением нагрева составлял 75°C и снизился до 3°C за 2 мин после его отключения при интенсивности продувки 0,25М).

Оценку эффективности производства товарного чугуна осуществляли по продолжительности усвоения науглероживающих добавок (использовали программу «Kinematica», ДГТУ) и продолжительности последующего нагрева расплава без учёта времени на технологические операции (замер температуры, отбор проб и ожидание результатов химического анализа). Для этого предварительно составили материальный и энергетические балансы. Определено, что при вводе кусковых добавок требуется 11 и 20 порций (по 70кг каждая) для графита и коксика соответственно. Увеличенное число порций для коксика объясняется, вероятнее всего, сравнительно малым коэффициентом усвоения углерода металлом. Предварительно численно рассчитали продолжительность растворения науглероживающих добавок при одинаковых условиях (продувка аргоном составляла 0,25М, температура и химический состав металла, место ввода), для разного фракционного состава (размер в поперечнике от 2мм до 50мм) и определили оптимальный фракционный состав кусковой добавки (размер в поперечнике 5мм) при ориентировочном объеме производства с цикличностью плавов через 6-8 часов. Более крупные куски коксика или графита увеличивали продолжительность обработки на У КП, а более мелкие оседали на шлаке. При этом усвоение углерода из них снижалось.

За время обработки на У КП коэффициент диффузии, рассчитанный по формуле (1) изменялся от $1,50 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$ при 2,10% [C] и $T=1530^\circ\text{C}$ до $3,18 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$ при 4,11% [C] и $T=1450^\circ\text{C}$ для графита, а для коксика изменялся от $1,47 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$ при 2,05% [C] и $T=1530^\circ\text{C}$ до $3,19 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$ при 4,14% [C] и $T=1432^\circ\text{C}$.

Результаты по усвоению углерода из кусковых добавок при принятом полном отсутствии шлака представлены на рис. 5. Порционный ввод значительных количеств материалов-добавок отражается на тепловом состоянии расплава, который становится индикатором ведения технологического процесса науглероживания и характеризует его цикличность (периодичность).

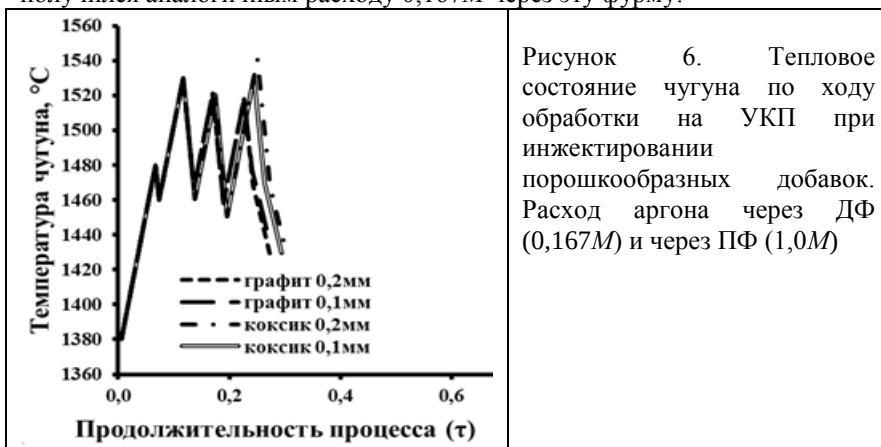


На этом рисунке и ниже за 1 (τ) принималась продолжительность обработки на У КП при науглероживании чугуна кусковым коксиком. Часть ломанной линии графика восходящей направленности обозначает нагрев, а нисходящей, охлаждение расплава за счёт ввода добавки совместно с потерями тепла через стенки и дно ковша и через свободную поверхность металла, либо потери без ввода таковой. Нагрев чугуна осуществлялся электрической дугой через каждые 3 порции подачи кусковых материалов-добавок. Такой регламент ведения технологии обеспечивает наиболее быструю скорость растворения науглероживающих материалов (если не происходит нагрева после 3-ей порции коксика, то его 4-ая порция растворяется почти в 2 раза медленнее 1-ой порции из-за более низкой температуры чугуна). Ввод науглероживающих кусковых материалов при работающем модуле нагрева чугуна по мнению авторов нежелателен, т.к. возможно их воспламенение и снижение уровня усвоения углерода. После ввода каждой порции добавок (кроме периода нагрева) в течении 5 мин осуществлялась гомогенизация металла по химическому составу. После последней порции добавок осуществлялась ещё 10-ти минутная гомогенизация, а полученная конечная температура чугуна при обработке

на УКП обеспечивала достаточный запас тепла жидкого металла для дальнейшей обработки (десульфурация магнием и разливка). В целом определено, что кусковый графит усваивается на $\approx 45\%$ быстрее кускового коксика за счёт меньшего количества вводимых порций.

Следует отметить, что затраты электроэнергии для непосредственного нагрева чугуна на УКП, при выбранном технологическом регламенте, достаточно велики, а их величина в формировании себестоимости на единицу продукции может быть соизмерима с аналогичными затратами в ферросплавном производстве.

Одним из наиболее перспективных способов ввода добавок является инжестирование порошкообразных частиц в расплав. Результаты численного моделирования по этому способу ввода добавок представлены на рис. 6. Отмечено, что для расхода аргона $0,33M$ через ДФ характер зависимости температуры чугуна от продолжительности процесса получился аналогичным расходу $0,167M$ через эту фурму.



При этом влияние интенсивности продувки через ДФ несущественно для каждого вида науглероживающих материалов, т. к. преваляющую роль играет продувка через ПФ несущим инертным газом. Разница продолжительности усвоения порошкообразного коксика и графита находится в пределах нескольких секунд.

Экспериментальные исследования по продолжительности растворения науглероживающих добавок выполнялись методом горячего физического моделирования для различного химического и фракционного состава материалов в лабораторных условиях. Проверена адекватность результатов численных и экспериментальных исследований по вводу кусковых науглероживающих добавок [15]. Отклонение составило не более 15%, что приемлемо для металлургической практики.

В дальнейшем численные исследования будут продолжены в направлении использования технологического регламента науглероживания металла за счёт ввода порошковой проволоки, а также с использованием шлакового покрова в чугунной ковшовой ванне при обработке расплава на У КП.

Выводы

1. Проведено численное моделирование гидродинамических и тепловых условий при обработке расплава на У КП в ковше малой ёмкости. Подтверждены закономерности, присущие аналогичным параметрам в ковшах средней и большой ёмкости.

2. Определено, что из рассмотренных вариантов более предпочтительным с точки зрения эффективности науглероживания чугуна является технологический регламент с использованием инжестирования графита с крупностью порошкообразных частиц 0,1 мм.

Библиографический список:

1. Технологический регламент "Сквозная технология производства товарного чугуна из попутных железосодержащих отходов производства титановых шлаков". ИЧМ НАНУ, ООО «ТитанПроект», 2012. – 85с.
2. ООО "ЗТМК" – Запорізький титано-магнієвий комбінат. Retrieved from sitiz@ztmc.zp.ua
3. Теплофизические свойства промышленных материалов /Ильченко К.Д., Чеченев В.А., Иващенко В.П., Терещенко В.С. / Справочник. Днепропетровск, Сич. - 1999. -152с.
4. Stelltime.ru
5. www.helpw.ru
6. В.Ф. Мороз, Э.В. Приходько. Коэффициент диффузии элементов в расплавах и сплавах/ Сб. науч. тр. «Фундаментальные и прикладные проблемы чёрной металлургии», ИЧМ НАН Украины. -№ 9, - 2004. - С. 161-169.
7. works.doklad.ru
8. Диффузия элементов в жидких металлах группы железа. Лепинских Б.Н., Кайбичев А.В., Савельев Ю.А. – Наука. - 1984. – 192с.
9. Массо-, теплоперенос в ванне емкостью 140т установки ковш-печь переменного тока / Пиптюк В.П., Самохвалов С.Е., Павлюченков И.А. и др. // Сталь, 2007, №11. -С47-50.
10. Исследование гидродинамики 350-ти тонной ковшевой ванны при обработке стали на установке ковш-печь / Пиптюк В.П., Поляков В.Ф., Самохвалов С.Е. и др. // Металлург. - 2009. - №11. – С.47-50.
11. Изучение теплового состояния ванны установки ковш-печь / Пиптюк В.П., Поляков В.Ф., Самохвалов С.Е. и др. // Металлург. – 2011. – №.7 – С. 50-53.
12. Экспериментальная проверка адекватности математических моделей гидродинамики и массопереноса для условий обработки на установке ковш-печь / Пиптюк В.П., Самохвалов С.Е., Павлюченков И.А. и др. // Металлург. – 2013. - №3. – С.50-53.

13. Влияние усиления футеровки в бойной части сталеразливочного ковша на параметры перемешивания расплава / Пиптюк В.П., Самохвалов С.Е., Логозинский И.Н. и др. // *Металлург.* – 2013. - №7. – С.29-34.
14. Рациональная компоновка продувочного узла 250т сталеразливочного ковша / Пиптюк В.П., Мосьян В.В., Моцный В.В. и др. // *Металлург.* – 2016. - №4. – С.35-38.
15. Проверка адекватности исследований эффективности использования ферросплавов на основе компьютерного моделирования и промышленных экспериментов / Пиптюк В.П., Греков С.В., Андриевский Г.А. и др. // *Международная научно-техническая конференция «Информационные технологии в металлургии и машиностроении».* ITMM 2018. 27.03.18-29.03.18, Дніпро. - 2018. Секция 3, с. 88

Reference

1. *Skvoznaya tekhnologiya proizvodstva tovarного chuguna iz poputnykh zhelezosoderzhashchikh otkhodov proizvodstva titanovykh shlakov [Through technology for the production of commercial iron from associated iron-containing waste products of titanium slag production].* (2012). Tekhnologicheskii reglament ICHM NANU, ООО «TitanProyekt» [ISI NASU, LLC TitanProekt], 2012, 85p. (In Russian).
2. ООО "ZTMK" – Zaporiz'kyy tytano-mahniyevyy kombinat [LLC "ZTMK" - Zaporozhye titanium-magnesium plant]. Retrieved from sitiz@ztmc.zp.ua
3. Ilchenko K.D., Chechenev V.A., Ivaschenko V.P. & Tereshchenko V.S. (1999). *Teplofizicheskiye svoystva promyshlennyykh materialov [Thermophysical properties of industrial materials].* Reference. Dnepropetrovsk: Sich, 1999, 152p. (In Russian).
4. Retrieved from Steelltime.ru
5. Retrieved from www.helpw.ru
6. Moroz V.F. & Prikhodko E.V. (2004). Koeffitsiyent diffuzii elementov v rasplavakh i splavakh [The diffusion coefficient of elements in melts and alloys]. *Fundamental'nyye i prikladnyye problemy chernoy metallurgii. Sb.nauchn.tr.ICHM [Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy, Sat. scientific tr. ISI NAS of Ukraine],* 2004, 9, 161-169. (In Russian).
7. Retrieved from works.doklad.ru
8. Lepinsky B.N., Kaybichev A.V. & Saveliyev Yu.A. (1984). *Diffuziya elementov v zhidkikh metallakh gruppy zheleza [Diffusion of elements in liquid metals of the iron group].* Nauka, 1984, 192p. (In Russian).
9. Pipyuk V.P., Samokhvalov S.E. & Pavlyuchenkov I.A. et al. (2007). Masso-, teploperenos v vanne yemkost'yu 140t ustanovki kovsh-pech' peremennogo toka [Mass and heat transfer in a bathtub with a capacity of 140 tons of an AC ladle-furnace installation]. *Stal' [Steel],* 2007, 11, P.47-50. (In Russian).
10. Pipyuk V.P., Polyakov V.F. & Samokhvalov S.E. et al. (2009). Issledovaniye gidrodinamiki 350-ti tonnoy kovshevoy vannы pri obrabotke stali na ustanovke kovsh-pech' [The study of the hydrodynamics of a 350-ton ladle bath during steel processing at a ladle-furnace installation]. *Metallurg [Metallurgist],* 2009, 11, 47-50. (In Russian).

«Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. – 2019. - Вып.33

«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33
ISSN 2522-9117 «Fundamental'nye i prikladnyye problemy černoј metallurgii». – 2019. – Vypusk 33

11. Pityuk V.P., Polyakov V.F. & Samokhvalov S.E. et al. (2011). Izucheniye teplovogo sostoyaniya vannoy ustanovki kovsh-pech' [The study of the thermal state of the bath of the ladle-furnace installation]. *Metallurg [Metallurgist]*, 2011, 7, 50-53. (In Russian).
12. Pityuk V.P., Samokhvalov S.E. & Pavlyuchenkov I.A. et al. (2013). Eksperimental'naya proverka adekvatnosti matematicheskikh modeley gidrodinamiki i massoperenosa dlya usloviy obrabotki na ustanovke kovsh-pech' [Experimental verification of the adequacy of mathematical models of hydrodynamics and mass transfer for processing conditions at the ladle-furnace installation]. *Metallurg [Metallurgist]*, 2013, 3, 50-53. (In Russian).
13. Pityuk V.P., Samokhvalov S.E. & Logozinsky I.N. et al. (2013). Vliyaniye usileniya futerovki v boynoy chasti stalerazlivochnogo kovsha na parametry peremeshivaniya rasplava [The effect of reinforcing the lining in the bottom of the steel pouring ladle on the parameters of melt mixing]. *Metallurg [Metallurgist]*, 2013, 7, 29-34. (In Russian).
14. Pityuk V.P., Mospan V.V. & Motsny V.V. et al. (2016). Ratsional'naya komponovka produvochnogo uzla 250t stalerazlivochnogo kovsha [The rational layout of the blowing unit 250t steel pouring ladle]. *Metallurg [Metallurgist]*, 2016, 4, 35-38. (In Russian).
15. Pityuk V.P., Grekov S.V. & Andrievsky G.A. et al. (2018). Proverka adekvatnosti issledovaniy effektivnosti ispol'zovaniya ferrosplavov na osnove komp'yuternogo modelirovaniya i promyshlennykh eksperimentov [Verification of the adequacy of studies on the efficiency of using ferroalloys based on computer modeling and industrial experiments]. *Mezhdunarodnaya nauchno-tehnicheskaya konferentsiya «Informatsionnyye tekhnologii v metallurgii i mashinostroyenii». ITMM (27.03.18-29.03.18) [International Scientific and Technical Conference "Information Technologies in Metallurgy and Mechanical Engineering". ITM]*, Dnipro, 2018, 3, 88. (In Russian).

В.П.Піптюк, к.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0002-2915-1756,

О.С.Вергун, д.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0001-5493-9214,

С.В.Греков, н.с., ORCID 0000-0003-2848-0999,

Інститут чорної металургії ім. З.І.Некрасова НАН України

С.Є.Самохвалов, д.т.н., зав.каф., проф. ORCID 0000-0002-7362-213X,

К.С.Красніков, к.т.н., ст. вик., ORCID 0000-0002-4241-0572

Дніпровський державний технічний університет (ДДТУ, м. Кам'янське)

Розробка технологічного регламенту науглецювання чавуну у 30т ковші. частина 1

Анотація. Представлено результати чисельного моделювання процесу науглецювання чавуну з низьким вмістом вуглецю, як попутного продукту виробництва титанового шлаку, для проектованої установки ківш-піч (УКП) з урахуванням умов ПАТ «Запорізький титаномagneзійовий комбінат». Розроблено технологічний регламент і проведено чисельне дослідження науглецювання металу в 30-т ковші на УКП. Для виробництва товарного чушкового чавуну використовуються попутні залізовмісні відходи. Мета роботи - виявлення

«Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии». – 2019. - Вып.33

«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33

ISSN 2522-9117 *«Fundamental'nye i prikladnye problemy černoј metallurgii». – 2019. – Vypusk 33*

факторів впливу позапічної обробки на оптимізацію технології. Виконано чисельне моделювання технологія науглецювання рідкого низьковуглецевого (до 2% вуглецю) чавуну кусковими (фракція до 50 мм) графітом і коксиком, що вводяться на поверхню ковшового ванни (без урахування шлакового покриву). Проведено матеріальний і енергетичний баланси процесу, вивчені властивості вуглецьмісних матеріалів, оцінено коефіцієнт дифузії вуглецю у рідкому металі. Результати досліджень гідродинамічних і теплових умов у ковшового ванні УКП оцінені по контурним діаграмам швидкості потоків і температурних полів для різних витрат аргону, що подається через донні фурми. Визначено оптимальні фракції матеріалів, що містять вуглець. Показано, що обробка на УКП кусковим графітом вимагає меншої тривалості ($\approx$ на 45%) у порівнянні з кусковим коксиком. Для прискорення процесу дифузійного розчинення вуглецю необхідно періодично (через кожні 3 порції по 70 кг графіту і коксика) нагрівати розплав до температури 1520-1530°C. Більш ефективному засвоєнню вуглецю і зменшенню тривалості процесу ($\approx$ на 1/3) сприяє інжекційне введення порошкоподібних графіту і коксика. Дослідження тривають в напрямку використання порошкового дроту для насичування вуглецем чавуну на УКП.

Ключові слова: графіт, коксик, науглецювання чавуну, установка ковш-піч,

V.P. Pityuk, PhD (Engin.), Senior Research Scientist, ORCID 0000-0002-2915-1756,
A.S. Vergun, Dr. Sci., (Engin.), Senior Research Scientist, ORCID 0000-0001-5493-9214,

S.V. Grekov, Research Scientist, ORCID 0000-0003-2848-0999,
Iron and steel Institute NAS Ukraine by Z.I.Nekrasov

S.E. Samohvalov, Dr. Sci., (Engin.), prof., head of dep., ORCID 0000-0002-7362-213X,

K.S. Krasnikov, PhD (Engin.), Senior teacher, ORCID 0000-0002-4241-0572
Dnieper State Technical University (DSTU, Kamenskoe)

Development of technological regulation for carbon ironing of iron in 30t ladle.

Part 1

Summary. The results of numerical simulation of the carbonization of low-carbon iron as a by-product of the production of titanium slag for the designed unit ladle-furnace (LF) installation as applied to the conditions of PJSC Zaporizhzhya Titanium-Magnesium Combine are presented. The technological regulations have been developed and a numerical study has been carried out on the carburization of metal in a 30-ton ladle at the LF. For the production of commercial pig iron, associated iron-containing waste is used. The purpose of the work is to identify factors of the influence of out-of-furnace processing on technology optimization. A numerical simulation was performed of the carburization technology of liquid low-carbon (up to 2% carbon) cast iron with lump (fraction up to 50 mm) graphite and coke introduced onto the surface of a ladle bath (excluding slag cover). The material and energy balances of the process were carried out, the properties of carburizing materials were studied, and the diffusion coefficient of carbon in a liquid metal was estimated. The results of studies of the hydrodynamic and thermal conditions in the bucket bath of the LF are estimated from the contour diagrams of the flow rates and temperature fields for different flow rates of

argon supplied through the bottom and submerged tuyeres. The optimal fractions of carbon-containing materials were determined. It has been shown that treatment on LF with lump graphite requires a shorter duration ($\approx 45\%$) compared with lump coke. To accelerate the process of diffusion dissolution of carbon, it is necessary to periodically (every 3 portions of 70 kg of graphite and coke) heat the melt to a temperature of 1520-1530 ° C. Injection of powdered graphite and coke contributes to a more efficient absorption of carbon and a decrease in the duration of the process ($\approx$ by 1/3). Research continues in the direction of using flux-cored wire for carburizing cast iron at LF.

Keywords: graphite, coke, carburization of cast iron, ladle furnace

For citation: *Piptyuk V.P., Samokhvalov S.Ye., Vergun A.S., Grekov S.V., Krasnikov K.S. Razrabotka tekhnologicheskogo reglamenta nauglerozhivaniya chuguna v 30-t kovshe. Chast' 1. [Development of technological regulations for the carburizing of cast iron in a 30-ton ladle. Part 1.]. «Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii».[Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy] 2020, 34. 129-142. (In Russian). DOI 10.52150/2522-9117-2019-33-123-142*

*Статья поступила в редакцию сборника 17.06.2019 года,
прошла внутреннее и внешнее рецензирование (Протокол заседания
редакционной коллегии сборника №2 от 23 декабря 2019 года)*

В.Г. Раздобрев, к.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0001-7402-7992

Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МИКРОЛЕГИРОВАНИЯ БОРОМ НА КОРРОЗИОННОЕ ПОВЕДЕНИЕ НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ КОНСТРУКЦИОННОЙ СТАЛИ В РАЗЛИЧНОМ СТРУКТУРНОМ СОСТОЯНИИ

Аннотация. Целью работы является исследование влияния бора, особенностей структурного состояния проката из низкоуглеродистой стали в горячекатаном и термически упрочненном состояниях на его коррозионную стойкость. Исследования коррозионной стойкости горячекатаной и термически упрочненной (закалка и отпуск при температурах 200-600 °С) низкоуглеродистой стали СтЗсп, содержащей 0,007 % В и не имеющей присадок бора проводили на шлифованных образцах при постоянном погружении в кислую среду комнатной температуры, обуславливающую протекание коррозии с водородной деполаризацией (1 Н раствор H_2SO_4), и при переменном погружении в агрессивные среды, вызывающие протекание коррозии с кислородной деполаризацией (в 3 %-ный раствор $NaCl$). Установлено, что скорость атмосферной коррозии горячекатаной низкоуглеродистой стали с бором и без бора практически одинакова. Экспериментально установлено, что образцы из борсодержащей стали (0,007 % В) при испытаниях в 1 Н растворе H_2SO_4 и при переменном погружении в 3 %-ный раствор $NaCl$ в термически упрочненном состоянии обладает более низкой сопротивляемостью коррозии, чем сталь без бора: максимальные коррозионные потери имели образцы, закаленные и отпущенные при температуре 300 °С. Как показали исследования микроструктур с помощью электронного микроскопа, при отпуске 300 °С закаленной борсодержащей стали выделяется много относительно мелких включений бора, способствующих так называемой структурной коррозии. Эти мелкодисперсные включения, большинство из которых идентифицировано как соединение Fe_2B , выделяются из пересыщенного твердого раствора при охлаждении и резко снижает стойкость стали против атмосферной коррозии. Таким образом, улучшая прокаливаемость низкоуглеродистой стали, бор существенно снижает ее коррозионную стойкость в агрессивных средах после закалки и отпуска.

Ключевые слова: низкоуглеродистая сталь, борсодержащая низкоуглеродистая сталь, атмосферная коррозия, коррозионные потери, микроструктура, включения бора, закалка, отпуск.

Ссылка для цитирования: Раздобрев В.Г. Исследование влияния микролегирования бором на коррозионное поведение низкоуглеродистой конструкционной стали в различном структурном состоянии. // «*Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*». – 2019. - Вып.33. – С.143-155. (In Russian). DOI 10.52150/2522-9117-2019-33-143-155

Вступление. В настоящее время и обозримом будущем, несмотря на активное развитие альтернативных неметаллических материалов, как-то: различного рода пластмасс повышенной и высокой прочности, пластиков, изделий и деталей на базе использования кремния и др., железо и сталь остаются главными конструкционными материалами в строительстве, энергетике, машиностроении и на транспорте.

Хорошее сочетание прочности, пластичности, вязкости, обрабатываемости резанием, изностойкости, возможность горячей пластической деформации прокаткой и ковкой в широком диапазоне температур и обжатый, возможность холодного формоизменения, штампуемость и сварка всеми ее видами делают эти материалы практически не заменимыми в различных областях современной техники и технологии. Поэтому ежегодное производство стали во всем мире непрерывно возрастает и в 2018 г. по данным *World Steel Association* (WSA) составило 1789,61 млн. т [1]. Особенно быстрыми темпами наращивается производство стали в Китае и в развивающихся странах [1, 2]. Хотя производство стали в Украине незначительно снизилось по сравнению с 2017 г. (21,42 млн. т), всего в 2018 г. оно составило 21,1 млн. т, т.е. примерно 12 % мирового количества стали [1].

В связи с боевыми действиями на юго-востоке Украины металлургическая отрасль страны потеряла ~ 30 % всех мощностей, находящихся на неподконтрольных Украине территориях. Тем не менее, в 2017-2018 г.г. наметилась тенденция к росту производства металлопроката, труб и железнодорожных колес на мощностях предприятий, которые находятся на подконтрольной Украине территории и экспорт которых обеспечивает главные валютные поступления в национальную экономику Украины.

Конструкционные стали используют как в горячекатаном, так и в термически упрочненном состоянии. Проведение операций термической обработки конструкционных сталей позволяет существенно повысить их прочностные свойства при удовлетворительных значениях пластических свойств. Легирование и микролегирование горячекатаных конструкционных сталей позволяет также повысить прочностные и пластические свойства готового металлопроката, но при этом существенно удорожает стоимость готового проката [3].

Конструкционная сталь массового производства и применения при всех ее преимуществах обладает и очень серьезным недостатком: она склонна к коррозионному разрушению в результате воздействия различных видов атмосферной, водной, морской, почвенной, щелевой, язвенной коррозии, коррозионного растрескивания под напряжением, водородного, солевого, щелочного охрупчивания и др.

Коррозионные процессы разрушения, усугубляются в последние десятилетия устойчивым ухудшением экологической обстановки практически во всех промышленно развитых странах, уничтожают за год до 20 % ежегодного мирового производства железа и стали и наносят ущерб, исчисляемый в 3,5-5 % годового национального дохода. По данным экспертных оценок в Украине ущерб от коррозии составляет 10-15 % всей продукции черных металлов. Стоимость противокоррозионной защиты в химической, нефтехимической, металлургической промышленности достигает 10-15 % общей стоимости строительных конструкций. Каждые три года необходимо перекрашивать 75 % металлоконструкций и 10-20 % заменять их из-за коррозионного износа [4].

Оптимальное микролегирование стали бором [5-7] улучшает прочностные характеристики стали после закалки с отпуском. О влиянии малых добавок бора на коррозионную стойкость низкоуглеродистых сталей достоверных сведений нет [8].

Цель работы. Исследование влияния бора, особенностей структурного состояния проката из низкоуглеродистой стали в горячекатаном и термически упрочненном состояниях на его коррозионную стойкость.

Современное состояние вопроса. Повышение прочности металлопроката и стальных изделий при сохранении необходимых потребительских и технологических свойств: пластичности, вязкости, свариваемости, штампуемости и др. является вместе с совершенствованием проектирования и методов расчета конструкций и сооружений основным условием снижения расхода металлов, поскольку позволяет уменьшить вес потребляемого в конструкциях стального проката за счет повышения его расчетных сопротивлений, в первую очередь, из-за возрастания предела текучести стали.

Наряду с традиционными методами термической обработки: нормализацией, которая, в основном, повышает вязкость стального проката [9-12], термическим улучшением (закалка с отдельного нагрева и высокий отпуск), что ведет к увеличению прочности в 1,5-2 раза и ударной вязкости, получают развитие различные виды и способы деформационно-термического упрочнения проката из низкоуглеродистых и низколегированных конструкционных сталей с использованием тепла прокатного нагрева [3, 7, 9-12].

Благодаря целенаправленному выбору и регулированию основных технологических параметров деформационно-термической обработки, как то: температура прокатки, степени и скорости деформации, скорости охлаждения металла после чистовой клетки стана, времени обработки и напряженного состояния удается в широких пределах изменять конечное

«Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии». – 2019. - Вып.33

«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33

ISSN 2522-9117 *«Fundamental'nye i prikladnye problemy černoј metallurgii». – 2019. – Vypusk 33*

структурное состояние стали с получением мелкозернистой структуры различной прочности, хорошей пластичности и сопротивляемости хрупкому разрушению. Применение прогрессивных методов деформационно-термической обработки, в том числе с применением способа прерванной закалки с самоотпуском наряду с принципиальным улучшением качества готовой продукции позволяет экономить энергетические ресурсы за счет сокращения в ряде случаев технологических операций как у производителя, так и у потребителя [3, 7, 9-12].

Поэтому в последние годы деформационно-термическая обработка с прокатного нагрева приобретает все более устойчивое применение при производстве различных групп сталей, включающих термически улучшаемые, арматурные, аустенитно-твердеющие феррито-перлитные, цементуемые, пружинные и аустенитные [13].

Вместе с этим эффективность и объем использования термически упрочненного проката, как качественно нового прогрессивного вида материала с повышенными характеристиками прочности, пластичности, вязкости, в значительной степени будет определяться его работоспособностью и долговечностью в реальных условиях эксплуатации при воздействии окружающих коррозионно-активных сред, т.е. его сопротивляемости коррозии. Однако, такой прокат из-за повышенной его энергетической и структурной метастабильности, может оказаться более склонным к коррозии, чем горячекатаный [14]. Известно, что из всех видов коррозии наибольший ущерб причиняет атмосферная коррозия (особенно язвенная) в топливно-энергетическом комплексе (ТЭК) от воздействия на оборудование и трубопроводы нефти, нефтепродуктов, газов и угля [4].

Атмосферная коррозия происходит при воздействии пленок влаги, попадающей на поверхность изделия в результате атмосферных осадков, либо конденсации влаги на поверхности металла на воздухе. Эта влага содержит растворенные газы, соли, аэрозоли и поэтому является более или менее сильным электролитом, вызывающим электрохимическую коррозию. Как известно, электролит – это вещество, которое в растворенном виде или в расплавленном состоянии обладает ионной связью и проводит электрический ток [15]. Металл и раствор электролита являются системами электрически заряженных частиц и между ними возникает электрохимическое взаимодействие, вызывающее коррозию. Первопричиной этого процесса является термодинамическая неустойчивость металла, связанная как с его структурным и напряженным состоянием, так и с особенностями конкретных окружающих коррозионных условий. Процессы коррозии металлов в растворах электролитов являются результатом одновременно протекающих на поверхности металла двух независимых электродных реакций: анодного окисления атомов металла и катодного восстановления окислительного компонента раствора, которые обычно

представляют в виде редокс реакции [15]. При атмосферной коррозии, как и при других ее видах (почвенная, морская, язвенная, щелевая и др.) главным окислителем (деполяризатором) является кислород (O_2). Помимо кислорода активными окислителями могут быть диоксид серы (SO_2), HCl , NH_3 и другие вещества, находящиеся в воздухе промышленных и жилых районов [16-19]. В последние десятилетия, из-за повышенных выбросов в атмосферу промышленных районов SO_2 , которая, взаимодействуя с влагой воздуха, образует H_2SO_4 , усиленно возрастает процесс атмосферной кислотной коррозии металлофонда, обусловленной «кислотными дождями». При таком коррозионном процессе, наряду с кислородом, окислителем (акцептором электронов) выступают ионы водорода (H^+) и в этом случае говорят о коррозии с водородной деполяризацией. Поэтому изучение закономерностей коррозионного поведения термически упрочненного проката, как метастабильной металлической системы, имеет важное практическое значение для выбора технологии обработки материалов, которые бы обеспечили удовлетворительное сочетание прочности, пластичности и коррозионной стойкости термически упрочненного металлопроката.

Современное производство массового вида высокопрочного крепежа (болты, гайки, шпильки) основано на использовании нескольких операций термической обработки как на стадии подготовки подката и калиброванной заготовки (отжиг), так и готовой продукции (закалка и отпуск) из низкоуглеродистой стали [20]. К достижениям по совершенствованию данного производства можно отнести организацию производства борсодержащих сталей, которое позволило расширить сортамент продукции в сторону больших типоразмеров за счет повышения прокаливаемости этих сталей [21, 22]. Однако вопросы коррозионной стойкости высокопрочного крепежа в этих работах не рассматривались.

Материал и методика исследований. Материалом исследования служила низкоуглеродистая сталь СтЗсп производства ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» следующего химического состава: $C=0,21\%$; $Mn=0,51\%$; $Si=0,23\%$; $S=0,024\%$; $P=0,004\%$; $B=0,007\%$. Для сравнения исследовали сталь близкого химического состава ($C=0,2\%$; $Mn=0,54\%$; $Si=0,22\%$; $S=0,026\%$; $P=0,008\%$) такого же способа производства, но не содержащую присадок бора. Металл изучали в горячекатаном состоянии и после упрочняющей термической обработки: заковки с отпуском при температурах 200-600 °С. Исследования проводили с использованием электронно-микроскопического и коррозионного методов. Электронно-микроскопическое изучение структуры осуществляли с помощью угольных реплик на микроскопе EF-2. Ускоренные коррозионные испытания проводили в искусственно создаваемых и контролируемых коррозионно-активных средах и условиях, имитирующих воздействие коррозионных факторов при атмосферной коррозии [23]. Исследования коррозионной стойкости

горячекатаной и термически упрочненной низкоуглеродистой стали Ст3сп, содержащей 0,007 % В и не имеющей присадок бора проводили на шлифованных образцах при постоянном погружении в кислую среду комнатной температуры, обуславливающую протекание коррозии с водородной деполяризацией (1 Н раствор H_2SO_4), и при переменном погружении в агрессивные среды, вызывающие протекание коррозии с кислородной деполяризацией (в 3 %-ный раствор $NaCl$). Оценку коррозионной стойкости исследованных сталей при коррозии с кислородной и водородной деполяризациями производили по изменению массы образца в соответствии с ГОСТ 9.308-85 [23].

На каждую экспериментальную точку отбирали 3-5 образцов. Продукты коррозии после завершения коррозионных испытаний удаляли по ГОСТ 9.9076-83 [24] механическим способом мягкими абразивами (чернильная и карандашная резинки), а трудно удаляемые продукты – катодным травлением в 10 % растворе H_2SO_4 , ингибированным уротропином. После удаления продуктов коррозии образцы промывали проточной водой, обрабатывали спиртом и/или ацетоном, высушивали 24 ч в эксикаторе и взвешивали.

Результаты исследований. На рисунке 1 показано влияние бора на коррозионное поведение низкоуглеродистой стали Ст3сп в горячекатаном и термически упрочненном состоянии при испытании в 1 Н растворе H_2SO_4 в течение 72 ч при комнатной температуре (коррозия с водородной деполяризацией).

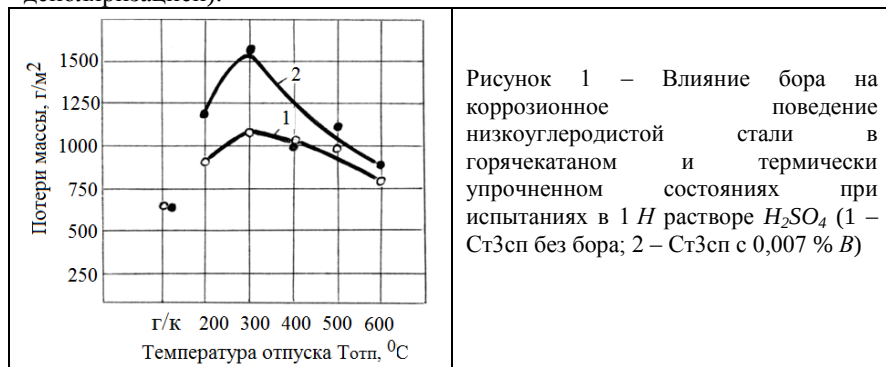
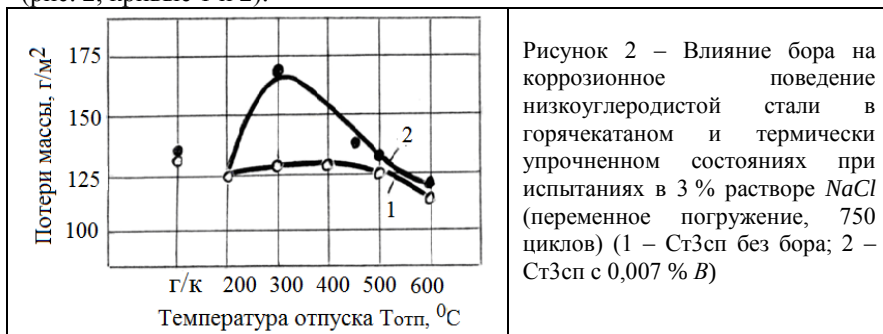


Рисунок 1 – Влияние бора на коррозионное поведение низкоуглеродистой стали в горячекатаном и термически упрочненном состоянии при испытаниях в 1 Н растворе H_2SO_4 (1 – Ст3сп без бора; 2 – Ст3сп с 0,007 % В)

Установлено, что при испытаниях в 1 Н растворе H_2SO_4 (коррозия с водородной деполяризацией) добавка бора в количестве 0,007 % существенно снижает коррозионную стойкость стали в термически упрочненном состоянии, особенно при температуре отпуска 300 °C (на 50 % по сравнению со сталью без бора и в 2 раза по сравнению с горячекатаным состоянием) (рис. 1, кривые 1 и 2). При более низких и высоких температурах отпуска коррозионные потери снижаются, т.е. в

стали с бором при отпуске от температуры 300 °С возникает четкий «коррозионный пик».

Качественно аналогичная картина наблюдается и при коррозии с кислородной деполяризацией (испытания в 3 % растворе NaCl, 750 циклов), но, естественно, при более низком уровне коррозионных потерь (рис. 2, кривые 1 и 2).



В отличие от термически упрочненного, в горячекатаном состоянии присадки бора практически не ускоряют коррозию с кислородной (3 % раствор NaCl) и водородной (1 Н раствор H₂SO₄) деполяризациями. Действительно, скорость коррозии, например, в 1 Н растворе H₂SO₄ сравнительно со сталью, имеющей в своем составе бор составляет соответственно 9,0 и 8,7 г/м²·ч. Такое различие находится в пределах ошибки измерения (±5 %). В чем причина повышения коррозионной активности термически упрочненной стали с бором, особенно при температуре отпуска 300 °С?

Электронномикроскопические исследования показали, что при отпуске закаленной стали с бором выделяется много относительно мелких включений бора, способствующих структурной коррозии. На рис. 3 представлена электронномикроскопическая структура стали с содержанием в ней бора 0,007 %, отпущенной при температуре 300 °С. На границах и внутри зерен наблюдается большое число мелкодисперсных включений, большинство из которых идентифицировано, как соединение Fe₂B (вид по стрелкам на рис. 3).

Эти включения выделяются из пересыщенного твердого раствора при охлаждении и резко снижают стойкость стали против коррозии. Более высокая температура отпуска, облегчая коагуляцию карбидных частиц, способствует уменьшению протяженности межфазной поверхности и приближает сталь с бором по уровню коррозионной стойкости к стали без бора. При отпуске от температур ниже 300 °С количество выделяющихся боридов, по-видимому, еще не достаточно, чтобы вызвать значительное повышение коррозионной активности.

«Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии». – 2019. - Вып.33

«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33

ISSN 2522-9117 «Fundamental'nye i prikladnye problemy černoј metallurgii». – 2019. – Vypusk 33

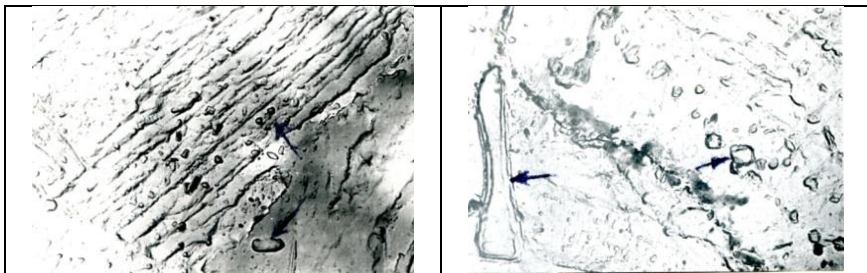


Рисунок 3 – Выделение включений бора в стали с содержанием в ней бора 0,007 % после закалки и отпуска при температуре 300 °С. $\times 12000$

Таким образом, улучшая прокаливаемость низкоуглеродистой стали, бор существенно снижает ее коррозионную стойкость в агрессивных средах после закалки и отпуска. Воспрепятствовать этому можно, по-видимому, путем воздействия на количество и распределение избыточной боридной фазы в закаленном и отпущенном металле. А при изготовлении металлопродукции, например метизного крепежа (болтов и шпилек), повышенной и высокой прочности путем термического упрочнения не следует проводить операции отпуска в интервале температур 250-350 °С во избежание резкого повышения коррозионной активности (ухудшения коррозионной стойкости) металла.

Выводы.

1. Установлено, что присадки бора (до 0,007 %) не оказывает влияния на коррозионное поведение горячекатаной конструкционной стали.
2. Установлено, что в термически упрочненных образцах из низкоуглеродистой стали, имеющей в химическом составе 0,007 % В скорость коррозии как с водородной, так и с кислородной деполяризациями возрастает по сравнению с термически упрочненными образцами из низкоуглеродистой стали, не содержащей бор.
3. Экспериментально определено, что образцы в термически упрочненном состоянии из стали, содержащей бор, имеют максимум коррозионных потерь после закалки и отпуска в районе температуры 300 °С, что связано с выделением частиц боридов.
4. Показано, что минимальные скорости коррозии наблюдаются в образцах из низкоуглеродистой борсодержащей стали, подвергнутых закалке и последующему отпуску при температурах ниже 250 °С и выше 350 °С. Причем значения коррозионных потерь (в пределах температур отпуска 400-600 °С) в этих образцах (сталь с 0,007 % В) незначительно отличаются от значений коррозионных потерь термически упрочненных образцов из стали, не содержащей бор.

5. Рекомендовано при изготовлении, например, крепежа повышенной и высокой прочности из борсодержащих конструкционных сталей с применением упрочняющей термической обработки не следует применять отпуск (самоотпуск) в районе 300 °С из-за существенного повышения коррозионной активности, а, следовательно, и снижения надежности крепежных узлов при эксплуатации конструкции в условиях воздействия окружающих коррозионно-активных сред.

Библиографический список

1. *Steel Statistical Yearbook 2018* / World Steel Association. – [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.worldsteel.org/media-centre/press-releases/2019/Global-crude-steel-output-increases-by-4.6--in-2018.html>
2. *Steel Statistical Yearbook 2017* / World Steel Association. – [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.worldsteel.org/en/dam/jcr:3e275c73-6f11-4e7f-a5d8-23d9bc5c508f/Steel+Statistical+Yearbook+2017.pdf>.
3. *Одесский П.Д.* Современные стали для строительных металлических конструкций и вопросы экономической эффективности // *Сталь*. – 2018. – №12. – С. 57-61.
4. *Коновалов О.Ф., Риженков О.А., Корольов В.П.* Системний підхід до моніторингу корозії та захисту металевих конструкцій // *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. – 2004. – № 5. – С. 99-103.
5. *Гольдштейн Я.Е., Мизин В.Г.* Модифицирование и микролегирование чугуна и стали // *М.: Металлургия*, 1986. – 272 с.
6. *Гольдшмидт Х.Дж.* Сплавы внедрения. // *М.: Мир*. – 1971. – Т.1 – 115 с.
7. *Кугушин А.А., Узлов И.Г., Калмыков В.В. и др.* Высокопрочная арматурная сталь // *М.: Металлургия*. – 1986. – 272 с.
8. *Медовар Б.И., Чекотило Л.В.* Аустенитно-боридные стали и сплавы для сварных конструкций // *К.: Наукова думка*. – 1970. – 146 с.
9. *Узлов И.Г., Савенков В.Я., Поляков С.Н.* Термическая обработка проката // *К.: Техника*. – 1981. – 159 с.
10. *Новиков И.И.* Теория термической обработки металлов // *М.: Металлургия*. – 1986. – 480 с.
11. *Курдюмов Г.В., Утевский Л.М., Энтин Р.И.* Превращения в железе и стали // *М.: Наука*. – 1977. – 238 с.
12. *Стародубов К.Ф., Узлов И.Г., Савенков В.Я. и др.* Термическое упрочнение проката // *М.: Металлургия*. – 1970. – 368 с.
13. *Бигус К., Эверц Т., Даль В.* Термомеханическая обработка конструкционных сталей // *Черные металлы*. – 1994. – № 1. – С. 29-35.
14. *Сокол И.Я., Ульянов Е.А., Фельдгандлер Э.Г. и др.* Структура и коррозия металлов и сплавов // *М.: Металлургия*. – 1989. – 400 с.
15. *Маттсон Э.* Электрохимическая коррозия: перв. со шведск. / Колотыркина Я.М. (ред.) // *М.: Металлургия*. – 1991. – 157 с.
16. *Беруитис Г.К., Кларк Г.Б.* Коррозионная устойчивость металлов и металлических покрытий в атмосферных условиях // *М.: Наука*. – 1971. – 159 с.

«Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. – 2019. - Вып.33

«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33

ISSN 2522-9117 «Fundamental'nye i prikladnye problemy černoј metallurgii». – 2019. – Vypusk 33

17. Кеше Г. Коррозия металлов. Физико-химические принципы и актуальные проблемы: пер. нем. // М.: Metallurgiya. – 1984. – 406 с.
18. Фишман Б.П., Фрисман И.А., Сержантов В.А., Монархов В.В. Защита от коррозии конструкций и оборудования металлургических цехов // К.: Техника. – 1983. – 216 с.
19. Розенфельд И.Л. Коррозия и защита металлов // М.: Metallurgiya. – 1969. – 448 с.
20. Ивченко А.В. Энергосберегающая ТМТО-технология изготовления высокопрочных крепежных резьбовых изделий // Сталь. – 2018. – №10. – С. 44-48. <https://doi.org/10.3103/S0967091218100030>
21. Парусов В.В. Сквозная технология производства высокопрочного крепежа из борсодержащих сталей // В.В. Парусов, Л.М. Катель, В.И. Биба [и др.] // Сталь. – 1996. – №1. – С. 51-53.
22. Бобылев М.В., Королева Е.Г., Штатников П.А. Перспективные экономнолегированные борсодержащие стали для производства высокопрочных крепежных деталей // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2001. – №6. – С. 5-55.
23. Покрyтия металлические и неметаллические. Методы ускоренных коррозионных испытаний: ГОСТ 9.308-85. // М.: Изд-тво стандартов. – 1986. – 20 с.
24. Единая система защиты от коррозии и старения. Металлы, сплавы, покрытия металлические. Методы удаления продуктов коррозии после коррозионных испытаний : ГОСТ 9.907-2007 (ISO 8407:1991). – М.: СТАНДАРТИНФОРМ. – 2008. – 19 с.

References

1. *Steel Statistical Yearbook*. (2018). World Steel Association. Electronic resource, Access mode <https://www.worldsteel.org/media-centre/press-releases/2019/Global-crude-steel-output-increases-by-4.6--in-2018.html>
2. *Steel Statistical Yearbook*. (2017). World Steel Association. Available at: <https://www.worldsteel.org/en/dam/jcr:3e275c73-6f11-4e7f-a5d8-23d9bc5c508f/Steel+Statistical+Yearbook+2017.pdf>.
3. Odesskiy P.D. (2018). Sovremennyye stali dlya stroitel'nykh metallicheskh konstruktсий i voprosy ekonomicheskoy effektivnosti [Modern steels for building metal structures and issues of economic efficiency]. *Stal' [Steel]*, 2018, 12, 57-61. (In Russian).
4. Kononov O.F., Ryzhenkov O.A. & Korolov V.P. (2004). Systemnyy pidkhd do monitorynhu koroziyi ta zakhystu metalevykh konstruktсий [Systemic response to monitoring corrosion and protection of metal structures]. *Fizyko-khimichna mekhanika materialiv [Physicochemical mechanics of materials]*, 2004, 5, 99-103. (In Russian).
5. Gol'dshteyn Ya.Ye. & Mizin V.G. (1986). *Modifitsirovaniye i mikrolegirovaniye chuguna i stali [Modification and microalloying of cast iron and steel]*. Moskva: Metallurgiya, 1986, 272 p. (In Russian).
6. Gol'dshmidt Kh.Dzh. (1971). *Splavy vnedreniya [Implementation alloys]*. Moskva: Mir, 1971, Vol.1, 115 p. (In Russian).

7. Kugushin A.A., Uzlov I.G. & Kalmykov V.V. et al. (1986). *Vysokoprochnaya armaturnaya stal'* [High-strength reinforcing steel]. Moskva: Metallurgiya, 1986, 272 p. (In Russian).
8. Medovar B.I., Chekotilo L.V. (1970). *Austenitno-boridnyye stali i splavy dlya svarnykh konstruksiy* [Austenitic-boride steels and alloys for welded structures]. Kiev: Naukova dumka, 1970, 146 p. (In Russian).
9. Uzlov I.G., Savenkov V.Ya. & Polyakov S.N. (1981). *Termicheskaya obrabotka prokata* [Heat treatment of rolled products]. Kiev: Tekhnika, 1981, 159 p. (In Russian).
10. Novikov I.I. (1986). *Teoriya termicheskoy obrabotki metallov* [Theory of heat treatment of metals]. Moskva: Metallurgiya, 1986, 480 p. (In Russian).
11. Kurdyumov G.V., Utevskiy L.M. & Entin R.I. (1977). *Prevrashcheniya v zheleze i stali* [Transformations in iron and steel]. Moskva: Nauka, 1977, 238 p. (In Russian).
12. Starodubov K.F., Uzlov I.G. & Savenkov V.Ya. et al. (1970). *Termicheskoye uprochneniye prokata* [Thermal strengthening of rolled products]. Moskva: Metallurgiya, 1970, 368 p. (In Russian).
13. Bigus K., Everts T. & Dal' V. (1994). *Termomekhanicheskaya obrabotka konstruksionnykh staley* [Thermomechanical treatment of structural steels]. *Chernyye metally* [Ferrous metals], 1994, 1, 29-35. (In Russian).
14. Sokol I.Ya., Ul'yanin Ye.A. & Fel'dgandler E.G. et al. (1989). *Struktura i korroziya metallov i splavov* [Structure and corrosion of metals and alloys]. Moskva: Metallurgiya, 1989, 400 p. (In Russian).
15. Mattson E. (1991). *Elektrokhimicheskaya korroziya* [Electrochemical corrosion]: perv. so shvedsk [translation from Swedish]. Ya.M. Kolotyorkina (Ed.). Moskva: Metallurgiya, 1991, 157 p. (In Russian).
16. Berukshtis G.K. & Klark G.B. (1971). *Korrozionnaya ustoychivost' metallov i metallicheskih pokrytiy v atmosferykh usloviyakh* [Corrosion resistance of metals and metal coatings in atmospheric conditions]. Moskva: Nauka, 1971, 159 p. (In Russian).
17. Keshe G. (1984). *Korroziya metallov. Fiziko-khimicheskiye printsipy i aktual'nyye problemy: per. nem* [Physico-chemical principles and topical problems: translation from German]. Moskva: Metallurgiya, 1984, 406 p. (In Russian).
18. Fishman B.P., Frisman I.A., Serzhantov V.A. & Monarkhov V.V. (1983). *Zashchita ot korrozii konstruksiy i oborudovaniya metallurgicheskikh tsekhov* [Corrosion protection of structures and equipment of metallurgical workshops]. Kiev: Tekhnika, 1983, 216 p. (In Russian).
19. Rozenfel'd I.L. (1969). *Korroziya i zashchita metallov* [Corrosion and protection of metals]. Moskva: Metallurgiya, 1969, 448 p. (In Russian).
20. Ivchenko A.V. (2018). *Energosberegayushchaya TMTO-tehnologiya izgotovleniya vysokoprochnykh krepzhnykh rez'bovykh izdeliy* [Energy-saving TMTO-technology of manufacturing high-strength fasteners, threaded products]. *Stal'* [Steel], 2018, 10, 44-48. (In Russian).
<https://doi.org/10.3103/S0967091218100030>
21. Parusov V.V., Katel' L.M. & Biba V.I. et al. (1996). *Skvoznaya tekhnologiya proizvodstva vysokoprochnogo krepzha iz borsoderzhashchikh staley*. [Through

- technology for the production of high-strength fasteners from boron-containing steels]. *Stal' [Steel]*, 1996, 1, 51-53. (In Russian).
22. Bobylev M.V., Koroleva Ye.G. & Shtatnikov P.A. (2001). Perspektivnyye ekonomnolegirovannyye borosoderzhashchiye stali dlya proizvodstva vysokoprochnykh krepезhnykh detaley [Promising economically alloyed boron-containing steels for the production of high-strength fasteners]. *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov [Metal Science and Heat Treatment]*, 2001, 6, 5-55. (In Russian).
 23. Pokrytiya metallicheskiye i nemetallicheskiye. Metody uskorennykh korrozionnykh ispytaniy [Metal and non-metal coatings. Methods for accelerated corrosion tests]. (1986). GOST 9.308-85., 1986, 20 p. (In Russian).
 24. Yedinaya sistema zashchity ot korrozii i stareniya. Metally, splavy, pokrytiya metallicheskiye. Metody udaleniya produktov korrozii posle korrozionnykh ispytaniy [Unified system of corrosion and ageing protection. Metals, alloys, metallic coatings. Methods for removal of corrosion products after corrosion tests]. (2008). GOST 9.907-2007 (ISO 8407:1991), 2008, 19 p. (In Russian).

В.Г. Раздобреца, к.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0001-7402-7992

Институт черной металлургии НАН Украины им. З.И. Некрасова

Дослідження впливу мікрولهгуванням бором на корозійну поведінку низьковуглецевих конструкційних сталей у різних структурних станах

Анотація. Метою роботи є дослідження впливу бору, особливостей структурного стану прокату з низьковуглецевої сталі в гарячекатаному і термічно зміцненому станах на його корозійну стійкість. Дослідження корозійної стійкості гарячекатаної і термічно зміцненої (гартування і відпустка при температурах 200-600 °C) низьковуглецевої сталі СтЗсп, що містить 0,007% В і не має присадок бору проводили на шліфованих зразках при постійному зануренні в кисле середовище кімнатної температури, що обумовлює протікання корозії з водневою деполаризацією (1 Н розчин H_2SO_4), і при змінному зануренні в агресивні середовища, що викликають протікання корозії з кисневою деполаризацією (в 3% -ний розчин NaCl). Встановлено, що швидкість атмосферної корозії гарячекатаної низьковуглецевої сталі з бором і без бору практично однакова. Експериментально встановлено, що в зразках зі сталі, яка містить бор (0,007% В) при випробуваннях в 1 Н розчині H_2SO_4 і при змінному зануренні в 3% -ний розчин NaCl в термічно зміцненому стані володіє більш низьким опором корозії, ніж сталь без бору: максимальні корозійні втрати мали зразки, які були загартовані і відпущені при температурі 300 °C. Як показали дослідження мікроструктур за допомогою електронного мікроскопу, при відпустці 300 °C в внутрішній будові загартованої борвмісної сталі виділяється багато дрібних включень бору, які сприяють так званій структурній корозії. Ці дрібнодисперсні включення, більшість з яких ідентифіковано як з'єднання Fe_2B , виділяються з пересиченого твердого розчину при охолодженні і різко знижують стійкість такої сталі проти атмосферної корозії. Таким чином, покращуючи прогартовуваність низьковуглецевої сталі, бор істотно знижує її корозійну стійкість в агресивних середовищах після гартування і відпустки.

Ключові слова: низьковуглецева сталь, борвмісна низьковуглецева сталь, атмосферна корозія, корозійні втрати, мікроструктура, включення бору, гартування, відпустка

V.G. Razdobreev, PhD (Engin.), Senior Researcher, ORCID 0000-0001-7402-7992

Iron and Steel Institute named after Z.I. Nekrasov of the NAS of Ukraine

Research of the influence of boron microallegation on the corrosion behavior of a low-carbon structural steel in various structural condition

Summary. The aim of the work is to study the effect of boron, structural features of the rolled steel of low-carbon steel in hot rolled and thermally hardened states on its corrosion resistance. Investigation of the corrosion resistance of hot-rolled and thermally hardened (quenching and tempering at temperatures of 200-600 °C) low-carbon steel St3sp containing 0.007% B and having no boron additives was carried out on polished samples with constant immersion in room temperature acidic medium, causing corrosion with hydrogen depolarization (1 N solution of H_2SO_4), and with variable immersion in aggressive media, causing corrosion with oxygen depolarization (in a 3 % NaCl solution). It was found that the atmospheric corrosion rate of hot-rolled low-carbon steel with and without boron is almost the same. It was experimentally established that samples of boron-containing steel (0.007 % B), when tested in a 1 N solution of H_2SO_4 and when immersed in a 3 % NaCl solution in a thermally hardened state, have a lower corrosion resistance than steel without boron: the maximum corrosion losses were samples hardened and tempered at a temperature of 300 °C. As shown by studies of microstructures using an electron microscope, when tempering 300 °C, hardened boron-containing steel is released, many relatively small inclusions of boron are released that contribute to the so-called structural corrosion. These finely divided inclusions, most of which are identified as Fe_2B , are released from the supersaturated solid solution upon cooling and sharply reduce the resistance of steel to atmospheric corrosion. Thus, improving the hardenability of low-carbon steel, boron significantly reduces its corrosion resistance in aggressive environments after quenching and tempering.

Keywords: low-carbon steel, low-carbon steel with boron, atmospheric corrosion, corrosion losses, microstructure, boron inclusions, hardening, tempering

For citation: Razdobrev V.G. Issledovaniye vliyaniya mikrolegirovaniya borom na korrozionnoye povedeniye nizkouglerodistoy konstruksionnoy stali v razlichnom strukturnom sostoyanii. [Study of the effect of microalloying with boron on the corrosion behavior of low-carbon structural steel in different structural states.]. *«Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii»*. [Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy] 2020, 34. 143-155. (In Russian). DOI 10.52150/2522-9117-2019-33-143-155

Статья поступила в редакцию сборника 11.09.2019 года, прошла внутреннее и внешнее рецензирование (Протокол заседания редакционной коллегии сборника №2 от 23 декабря 2019 года)

«Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. – 2019. - Вып.33
«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33

ISSN 2522-9117 «Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii». – 2019. – Vypusk 33

В.Г. Раздобреєв, к.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0001-7402-7992

Д.Г. Паламар, м.н.с., ORCID 0000-0002-9503-3248

Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ГАРЯЧОЇ НЕСИМЕТРИЧНОЇ СОРТОВОЇ ПРОКАТКИ НА ФОРМУВАННЯ МІКРОСТРУКТУРИ, МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТА СЛУЖБОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГОТОВОГО ПРОКАТУ

Анотація. Метою роботи є дослідження впливу процесу гарячої несиметричної прокатки на структурний стан, механічні властивості і експлуатаційні характеристики сортового прокату простої форми з рядової вуглецевої сталі. Для моделювання процесу несиметричної сортової прокатки у раніше розроблену в ІЧМ математичну модель були додані можливості урахування випадків прокатки у парі валків різного діаметра, прокатки у парі валків з різного матеріалу, прокатки з одним привідним та одним непривідним валками, прокатка з різними швидкостями у парі валків і ін. Розрахунки показали зниження сили прокатки до 10 % при несиметричному процесі прокатки у порівнянні з традиційним процесом прокатки. Дослідження особливостей процесу гарячої несиметричної прокатки (прокатка із зсувом) в порівнянні з традиційним процесом прокатки проводили в промислових умовах при виробництві квадратного профілю 12x12 мм з рядової низьковуглецевої сталі СтЗсп. Встановлено, що середні значення HRB , σ_B і σ_T в досліджених зразках практично не відрізняються, а середні показники δ_5 вище на 8 % (абс.) або на ~ 27 % (відн.) в зразках, що були прокатані за технологією несиметричної прокатки, ніж в зразках, які були прокатані за технологією традиційної прокатки. Оцінка щільності дислокацій за допомогою рентгеноструктурного методу показала, що під час гарячої несиметричної прокатки фіксується менша на ~ 46 % щільність дислокацій внаслідок активного протікання процесів полігонізації і рекристалізації *in-situ* в ході деформації. При цьому середні значення мікропорушень кристалічної ґратки фериту на 21 % нижче в зразках, отриманих способом несиметричної прокатки ніж у зразках, отриманих традиційною прокаткою. Вперше встановлено зниження сумарної швидкості атмосферної корозії у зразках, що були прокатані за технологією способом несиметричної прокатки (0,39 г/м²хгод) в порівнянні з зразками, які були прокатані за технологією традиційної прокатки (0,445 г/м²хгод).

Ключові слова: несиметрична сортова прокатка, традиційна прокатка, мікроструктура, мікротвердість, твердість, механічні властивості, швидкість атмосферної корозії.

Ссылка для цитирования: Раздобрев В.Г., Паламар Д.Г. Дослідження впливу гарячої несиметричної сортової прокатки на формування мікроструктури, механічних властивостей та службових характеристик готового прокату.

«Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии». – 2019. - Вып.33

«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33

ISSN 2522-9117 «Fundamental'nye i prikladnye problemy černoј metallurgii». – 2019. – Vypusk 33

Вступ. Використання пластичної деформації для формування структури і комплексу механічних та експлуатаційних характеристик металів є доволі поширеним прийомом. Однак, незважаючи на великий обсяг наукової та технологічної інформації в даній області, проблему не можна вважати повністю вивченою, так як в основі багатьох технологій лежать емпіричні закономірності. Розширення теоретичних і модельних уявлень про природу формування властивостей металевих матеріалів в процесі деформації є актуальним і представляє не тільки науковий, але і практичний інтерес, оскільки відкриває можливості для оптимізації існуючих та створення нових науково обґрунтованих технологічних процесів отримання матеріалів з підвищеним комплексом властивостей.

Мета роботи. Встановлення впливу гарячої несиметричної прокатки на формування структурного стану, механічних властивостей та експлуатаційних характеристик при виробництві сортового прокату простої форми з рядової вуглецевої сталі.

Сучасний стан питання. Підвищення якості готової продукції, а також скорочення витрат на її виробництво є одним з актуальних напрямків у сучасній металургії. Сучасні вимоги до виробників полягають в необхідності забезпечення виробництва готового прокату широкого розмірного і марочного асортименту з високим рівнем механічних і службових властивостей при зниженні енерго-, матеріало- і трудомісткості виробництва. Крім того, споживачі висувають високі вимоги до точності профілю, станом поверхні і товарного вигляду.

Безперервна прокатка є основним способом отримання масової металопродукції: листів, сорту, катанки і ін. Підвищення якісних характеристик (міцності, пластичності і ін.) стало можливим при комплексному підході до розробки технологічних режимів виробництва сортового прокату і катанки на безперервних станах з урахуванням температурно-швидкісних і деформаційних параметрів, а також умов формозміни і післядеформаційного охолодження, які безпосередньо впливають на формування дрібнозернистої мікроструктури під час гарячої деформації. У той же час в пошуках способів отримання ультрадрібнозернистої структури сталі і сплавів, яке забезпечує підвищення міцності сталей при підвищенні або збереженні високих пластичних властивостей, підвищення корозійної стійкості і ударної в'язкості перспективним видається використання специфічних способів деформаційного впливу – здійснення інтенсивної пластичної деформації (деформація в умовах високих всебічних тисків): прокатка-пресування,

гідроекструзія, квазігідроекструзія, газоекструзія, несиметрична прокатка та ін.

Останнім часом у світовій металургії спостерігається тенденція до реалізації так званих складних випадків прокатки (несиметричних процесів прокатки). До них слід віднести прокатку в валках нерівного діаметра, прокатку з різними окружними швидкостями валків, прокатку з різними умовами тертя на контакті з верхнім і нижнім валками і т.п.

Розглядом питань несиметричних процесів прокатки займаються досить давно [1], оскільки на практиці не існує «ідеально симетричного» процесу прокатки. Діаметри валків (а значить і їх окружні швидкості) завжди різняться хоча б в невеликій мірі.

У практиці прокатного виробництва часто спостерігаються ситуації, коли умови зовнішнього тертя на верхньому і нижньому валках не однакові. Є безліч причин, що викликають цю різницю. Наприклад, при прокатці нагрітих заготовок пічна окалина з їх нижньої сторони легко обсапється, а на верхній поверхні зберігається протягом декількох проходів (до кантування).

У всіх випадках, коли коефіцієнти тертя на валках різні, процес прокатки набуває рис несиметричного процесу. Це знаходить відображення в нерівності деформаційних параметрів процесу.

Виходячи з вищесказаного, виникає необхідність визначення основних підходів відносно розробки технологічних рішень, які дозволять реалізовувати отримання прокату з підвищеним рівнем механічних властивостей та експлуатаційних характеристик (міцність і пластичні властивості, ударна в'язкість, корозійна стійкість і ін.).

Подібним питанням присвячені роботи українських вчених і науковців з ближнього зарубіжжя [2-13].

Так, наприклад, автори роботи [14] прийшли до висновку, що прокатка з різними окружними швидкостями валків дозволяє домогтися істотного зменшення розмірів зерен за рахунок значних зсувних деформацій. Результати експериментів по прокатці кременистої стали показали можливість отримання зерна розміром 10-50 нм. В даному випадку мова йде про так звану поверхневу нанокристалізацію, яка істотно змінює механічні та службові властивості матеріалів, а так само підвищує опір втомі, зносу і корозії.

В роботі [15] показано, що найбільш керованим параметром несиметричною прокатки є співвідношення лінійних швидкостей валків. Експериментальні дослідження, проведені в умовах товстолистого стану 3000 Маріупольського металургійного комбінату, показали, що за допомогою різних швидкостей валків можна домогтися зниження сили прокатки на 10 %.

Необхідно підкреслити, що переважна частина досліджень, які стосуються вивчення несиметричних випадків прокатки, присвячена виробництву листового прокату.

У той же час слід зазначити, що у випадку сортової прокатки звичайні показники деформації стають змінними по ширині калібру і відрізняються для різних елементів профілю. Перш за все, відрізняється величина абсолютного і відносного обтиску в калібрі. Крім того, важливою особливістю деформації в калібрах є неодноразовість початку обтиснень всіх елементів перерізу розкату при його вході в калібр.

Що стосується процесу сортової прокатки, в літературі наводяться окремі відомості про вплив деяких факторів, властивих несиметричного процесу прокатки, на розмір зерна деформованого металу.

Матеріал та методика досліджень. Дослідження особливостей гарячої несиметричної прокатки (прокатка із зсувом) в порівнянні з традиційною схемою прокатки проводили в умовах ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» при виробництві квадратного профілю. Матеріалом досліджень були зразки промислового виробництва (квадрат розміром 12x12 мм з граничними відхиленнями + 0,3/ - 0,5 мм звичайної точності групи В1 за ДСТУ 4746:2007 або за ГОСТ 2591-2006) після гарячої деформації рядової вуглецевої сталі марки Ст3сп за ДСТУ 2651:2005 або за ГОСТ 380-2005. Механічні властивості для даного виду прокату за ДСТУ 4484:2005 або за ГОСТ 535-2005 повинні відповідати вимогам, наведеним в табл. 1.

Таблиця 1 – Механічні властивості сортового і фасонного прокату із сталі вуглецевої звичайної якості для квадрату 12x12 мм за ДСТУ 4484: 2005/ГОСТ 535-2005

Марка сталі	Механічні властивості			
	Тимчасовий опір розриванню, $\sigma_B, \text{Н/мм}^2$	Границя плинності, $\sigma_T, \text{Н/мм}^2$, не менш	Відносне видовження, $\delta_5, \%$ не менш	Згинання до паралельності сторін в холодному стані (a – товщина зразка, мм; d – діаметр оправки, мм.)
Ст3сп	370-480	245	26	$d = a$

Сталь прокатувалася в умовах безперервного дрібносортового стану ДС 250-1 ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» за традиційною технологією, що зазвичай використовуються при прокатці такої сталі в заводських умовах, і за технологією несиметричної прокатки (прокатка із зсувом (ПЗ)). Технологічний процес виробництва сортового прокату в умовах усіх сортових станів ПАО «АрселорМіттал Кривий Ріг» передбачає використання ліній прискореного охолодження готового прокату з

рядових низьковуглецевих марок сталей. Після прокатки за діючою технологією та за дослідницькою технологією відбирали зразки довжиною 400 мм для проведення подальших досліджень.

Для проведення досліджень застосовували такі методи: світлову мікроскопію, кількісну металографію з використанням аналізатора Epiquant, механічні випробування для визначення твердості, мікротвердості, характеристик міцності і пластичності, рентгеноструктурний аналіз та корозійні випробування. Вимірювання мікротвердості фериту та перліту проводили в периферійних (середні значення по 20 вимірам в різних зонах – чисельник) і центральних (середні значення по 10 вимірам в центрі – знаменник) зонах.

Рентгеноструктурні дослідження проводили зйомкою зі шліфа в дифрактометрі ДРОН-3 і апараті УРС-2.0.

Прискоренні корозійні випробування проводили в штучно створених та контрольованих корозійно-активних середовищах і умовах, що імітують вплив корозійних факторів при атмосферній корозії [16]. Для дослідження атмосферної корозії (з кисневою деполяризацією) використовували лабораторну установку типу «Корозійне колесо» зі змінним зануренням зразків в електроліт (3 % розчин NaCl). Корозійний процес здійснювали чергуванням занурення зразків у агресивне середовище і висушуванням їх на повітрі. Цикл «змочування-висихання» становив 26 хв. (5 хв. занурення в електроліт, решту часу – на повітрі). Повне висихання зразків після змочування забезпечували застосуванням вентилятора. Мінімальна тривалість корозійних випробувань становила 750 циклів змінного занурення (сталій процес). Оцінювання корозійної стійкості зразків, що досліджувались проводили по зміні маси зразків відповідно з ГОСТ 9. 308-85 [16]. При цьому фіксували величину поверхні зразків та час її контакту з агресивним середовищем. При проведенні корозійних випробувань та оцінки корозійної стійкості по втраті маси зразки до випробувань піддавали шліфуванню, знежирювали органічними розчинниками (спиртом, ацетоном та ін.). На кожну експериментальну точку відбирали по 5-7 зразків. Продукти корозії після завершення корозійних випробувань видаляли за ГОСТ 9.907-83 [17] механічним засобом м'якими абразивами (чорнильна та олівцева гумки). Після видалення продуктів корозії зразки промивали проточною водою, обробляли спиртом і/або ацетоном, висушували 24 години в ексікаторі та зважували. Надавали також візуальну оцінку результатів при дослідженні корозії: наявність та характер поверхневих продуктів корозії (рівномірне, нерівномірне, виразкові, щільні, пухкі та ін.).

Результати досліджень. Для моделювання процесу несиметричної сортової прокатки у раніше розроблену в ІЧМ математичну модель [18, 19] були додані можливості урахування випадків прокатки у парі валків

«Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии». – 2019. - Вып.33

«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33

ISSN 2522-9117 «Fundamental'nye i prikladnye problemy černoј metallurgii». – 2019. – Vypusk 33

різного діаметра, прокатки у парі валків з різного матеріалу, прокатки з одним привідним та одним непривідним валками, прокатка з різними швидкостями у парі валків і ін.

Розрахунки показали зниження сили прокатки до 10 % при несиметричному процесі прокатки у порівнянні з традиційним процесом прокатки. За методикою роботи [20] оцінили деформацію, яка накопичується при гарячій прокатці із зсувом. Так, при прокатці із зсувом деформацію можна розкласти на деформацію прокатки і деформацію зсуву. Для визначення ступеню деформації прокатки в робочій кліті використовували формулу:

$$e = \ln\left(\frac{S}{S_0}\right) \quad (1)$$

де e – ступінь деформації;
 S – площа розкату після деформації, мм²;
 S_0 – площа розкату до деформації, мм².

Розрахунок показав, що одинична ступінь деформації при прокатці становить $e = 0,36$. Деформацію зсуву розраховували по формулі, яка використовується при визначенні деформації при рівноканальному кутовому пресуванні (РККП) [20]:

$$e = 2 \frac{\cot \theta}{\sqrt{3}} \quad (2)$$

де e – ступінь деформації;
 θ – кут каналу при рівноканальному кутовому пресуванні, градус.

Після спрощення та усереднення деформації, що накопичується, отримали оцінку середнього значення деформації, що накопичується у калібрі робочої кліті при зсуві $e = 0,14$. Таким чином, загальна деформація, що накопичується буде дорівнювати: $e = 0,36 + 0,14 = 0,5$, що на 40 % більш ніж у випадку прокатки без зсуву. Дані оцінювання задовільно узгоджуються з експериментальними вимірюваннями потужності, яка споживається двигунами валків робочої кліті [20]. Як відомо, потужність прямо пропорційна зв'язана з тиском на робочій інструмент та деформацією, що накопичується. В роботі [21] встановлена експериментально різниця потужності, яка споживається складає 30 %, що на 10 % менш, чим зміна деформації у наших оцінках. Таким чином, оцінка ступеню деформації, яка виконана розрахунковим шляхом, різниться на 10 % з експериментально встановленим значенням та є

цілком допустимим з урахуванням того, що для її оцінки скористалися формулою для розрахунку деформації при РККП.

Основні результати досліджень, отримані в роботі, зведені в табл. 2 та 3, з яких випливає наявність різниці механічних і корозійних властивостей сталі, а також внутрішньої будови зразків, які були прокатані за традиційною технологією і з використанням несиметричної прокатки.

Таблиця 2 – Результати досліджень механічних властивостей та корозійних випробувань зразків квадрату 12x12 мм зі Ст3сп, що були отримані традиційною та несиметричною прокаткою

Характеристика	Спосіб гарячої сортової прокатки	
	Традиційна прокатка	Несиметрична прокатка
Твердість, HRB	67	67
Тимчасовий опір розриванню, $\sigma_B, H/mm^2$	435	432
Границя плинності, $\sigma_T, H/mm^2$	313	315
Відносне видовження, $\delta_5, \%$	30,0	38,0
Згинання до паралельності сторін в холодному стані при $d = a$	задовільно	задовільно
Швидкість атмосферної корозії, $K, g/m^2 \cdot год$	<u>0,43-0,46*</u> 0,445	<u>0,38-0,40</u> 0,39

Примітка. * – У чисельнику значення мінімальної і максимальної швидкості корозії; в знаменнику – середні швидкості корозії.

Таблиця 3 – Результати досліджень металографічного та рентгенографічного аналізів зразків квадрату 12x12 мм зі Ст3сп, що були отримані традиційною та несиметричною прокаткою

Характеристика	Спосіб гарячої сортової прокатки	
	Традиційна прокатка	Несиметрична прокатка
Структура, кількість Ф/П, %	Ф+П (64/36)	Ф+П (75/25)
Мікротвердість фериту периферія/центр, H/mm^2	1560/1360	1520/1580
Мікротвердість перліту периферія/центр, H/mm^2	3170/3150	3090/3110
Бал зерна фериту в центрі зразка	10	11
Бал колоній перліту в центрі зразка	10	11
Щільність дислокацій ρ, cm^{-2}	$1,6 \times 10^{10}$	$0,85 \times 10^{10}$
Мікропорушення кристалічної ґратки $\Delta a/a$, мкрд	0,19	0,15

З аналізу даних, наведених в табл. 2 можна відмітити наступне. Невдівлячись на те, що середні значення HRB , σ_B і σ_T в цих зразках практично не відрізняються, середні показники δ_5 вище на 8 % (абс.) або на ~ 27 % (відн.) в зразках, що були прокатані за способом несиметричної прокатки, ніж в зразках, які були прокатані за технологією традиційної прокатки. За даними корозійних випробувань вперше встановлено, що сумарна швидкість атмосферної корозії (корозія з кисневою деполяризацією) знижується на ~ 12,5 % у зразках, що були прокатані за способом несиметричної прокатки, ніж в зразках, які були прокатані за технологією традиційної прокатки. Причини цього буде надано нижче, після аналізу результатів металографічного дослідження зразків квадрату 12x12 мм зі СтЗсп, які були отримані традиційною та несиметричною прокаткою.

З аналізу даних, наведених в табл. 3 визначено, що мікроструктура зразків, виготовлених зі сталі марки СтЗсп за традиційною технологією з подальшим прискореним охолодженням водою та після гарячої несиметричної прокатки з подальшим прискореним охолодженням водою складається з фериту та перліту. Співвідношення кількості фериту до кількості перліту в зразках, які отримали за традиційною технологією дорівнювало 64 % Ф і 36 % П, а в зразках, які отримали за способом гарячої несиметричної прокатки дорівнювало 75 % Ф до 25 % П. При визначенні розмірів перліту і фериту методами світлової мікроскопії використовували стандартну шкалу. Значення розмірів в балах для центральних зон поперечних зрізів квадрату 12x12 мм, отриманих за традиційною технологією дорівнювало для зерна фериту – 10 та колоній перліту – 10. Значення розмірів в балах для центральних зон поперечних зрізів квадрату 12x12 мм, отриманих за способом гарячої несиметричної прокатки дорівнювало для зерна фериту – 11 та колоній перліту – 11. Таким чином мікроструктура центральних зон поперечних зрізів квадрату 12x12 мм, отриманих за способом гарячої несиметричної прокатки більш дрібнозерниста ніж в зразках, які були прокатані за технологією традиційної прокатки.

Зниження сумарної швидкості атмосферної корозії у зразках, що були прокатані способом несиметричної прокатки в порівнянні з зразками, які були прокатані за технологією традиційної прокатки, обумовлено тим, що зменшення розміру дійсного зерна фериту, внаслідок чого електрохімічна активність границь його зерен зменшується за рахунок зниження на них концентрації розчинених в сталі домішок (кисню, азоту, фосфору та ін.), викликаної в свою чергу, зростанням протяжності границь. При цьому збільшення кількості перліту в структурі сталі з 25% (несиметрична прокатка) до 36 % (традиційна прокатка) підвищує не тільки твердість та міцнісні властивості, але й корозійну активність готового прокату.

«Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. – 2019. - Вып.33

«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33

ISSN 2522-9117 «Fundamental'nye i prikladnye problemy černoј metallurgii». – 2019. – Vypusk 33

Під час аналізу даних, наведених в табл. 3 встановлено, що середні значення мікротвердості фериту на периферійних ділянках і перліту, як на периферії так і у центрі мало відрізняються у зразках, що досліджувались. Однак середнє значення мікротвердості фериту у центрі зразків, отриманих способом несиметричної прокатки вище на 220 Н/мм^2 , ніж в зразках, отриманих традиційною прокаткою. Оскільки довірчі інтервали вимірювань середніх значень мікротвердості фериту значно менш у зразках, отриманих способом несиметричної прокатки ніж у зразках, отриманих традиційною прокаткою, то можна констатувати, що зразки, які отримані способом несиметричної прокатки більш структурно однорідні і менш напружені. Це підтверджується рентгеноструктурними дослідженнями. При гарячій несиметричній прокатці формується велика кількість дрібнодисперсних зерен з висококутовими границями і малою щільністю дислокацій. Середнє значення щільності дислокацій (ρ , см^{-2}) в зразках, отриманих при традиційній гарячій сортовій прокатці дорівнювало $1,6 \times 10^{10}$, а в зразках, які були прокатані при несиметричній прокатці – $0,85 \times 10^{10}$. При цьому середні значення мікропорушень кристалічної ґратки ($\Delta a/a$, мкрад) в зразках, які були отримані традиційною прокаткою дорівнювали 0,19, а в зразках, що отримали несиметричною прокаткою – 0,15. Більш низький рівень напруженості кристалічної ґратки і сприяє підвищенню пластичності. Таким чином рівень мікропорушень в зразках, отриманих способом несиметричної прокатки на 21 % та щільність дислокацій на ~ 46 % нижче, ніж у зразках, отриманих традиційною прокаткою.

В результаті гарячої прокатки з використанням як валків однакового так і різного діаметру здійснюється динамічна рекристалізація, яка полягає в зміні розмірів і форми зерен і їх орієнтації в процесі деформації. Відомо [22-26], що в металах і сплавах з невисокою енергією дефекту упаковки, зокрема Cu, Ni, γ -Fe, динамічна рекристалізація проходить по переривчастому механізму. Зародками нових зерен стають ділянки, обмежені великокутовими границями, які можуть сформуватися з субзерна при збільшенні кута розорієнтування в процесі деформації. Таким чином, нові зерна утворюються практично без міграції великокутових границь, і динамічна рекристалізація здійснюється шляхом зародження центрів з великокутовими границями [27, 28]. Надалі відбувається їх міграція в напрямку ділянок з більшою щільністю дислокацій.

Наші дані показують, що зерна, сформовані після несиметричної прокатки, незважаючи на невеликий розмір і малу щільність дислокацій усередині зерна, не схильні до швидкого зростання. У матеріалі не спостерігається розвитку бурхливої збиральної рекристалізації. Це свідчить про рівноважні границі, що утворилися при несиметричній

«Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии». – 2019. - Вып.33

«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33

ISSN 2522-9117 «Fundamental'nye i prikladnye problemy černoј metallurgii». – 2019. – Vypusk 33

прокатці. Тому схильність до збиральної рекристалізації нижче, а значить, рушійна сила менше.

Проведені дослідження показують, що в ході деформації з використанням способу гарячої несиметричної прокатки утворюється структура, що відрізняється кількістю дефектів всередині зерна, а також характеризується наявністю рівноважних висококутових границь зерен, в той час як прокатка з використанням технології традиційної гарячої сортової прокатки призводить до формування дрібнодисперсної структури з великою кількістю дефектів і розвиненими субграницями. Отримані експериментальні результати показують, що формується аустенітна структура, яка на різних етапах деформації, характеризується різним перебігом процесів гарячого зміцнення і знеміцнення.

Таким чином, за допомогою проведених комплексних досліджень показано, що використання способу гарячої несиметричної сортової прокатки, формує більш досконалу і однорідну суб- і мікроструктуру рядової сталі марки СтЗсп після її прокатки й охолодження в сортові профілі простої форми. Найбільш простим способом здійснення комбінованої пластичної деформації зі зсувом в умовах діючих прокатних станів українських підприємств є прокатка з використанням валків різного діаметру. Проте, для відповіді на питання якою повинна бути різниця між діаметрами верхнього та нижнього валків у кожному конкретному випадку, потрібно проведення додаткових досліджень.

Висновки.

1. Досліджені закономірності формування структури, механічних властивостей і експлуатаційних характеристик зразків квадратного профілю 12х12 мм зі сталі Ст.Зсп, отримані під час гарячої несиметричної сортової прокатки та прокатки за традиційною технологією з подальшим прискореним охолодженням.
2. Встановлено, що спосіб гарячої несиметричної сортової прокатки характеризується великими разовими обтисканнями за прохід, що викликає значну гарячу деформацію аустеніту і сприяє активному розвитку рекристалізації. Підтвердженням цього є більші середні значення мікротвердості фериту в центрі зразків готового прокату (на 220 Н/мм²), отриманого за способом гарячої несиметричної сортової прокатки.
3. Визначено підвищення пластичних характеристик на ~ 27 % (відн.) у готовому прокаті, який було отримано за способом гарячої несиметричної сортової прокатки в порівнянні з прокатом, що були отримані за традиційною технологією. При цьому показники міцності та твердості знаходяться приблизно на однаковому рівні.
4. Оцінка щільності дислокацій за допомогою рентгеноструктурного методу показала, що під час гарячої несиметричної прокатки фіксується

*«Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. – 2019. - Вып.33
«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33*

ISSN 2522-9117 *«Fundamental'nye i prikladnye problemy černoј metallurgii». – 2019. – Vypusk 33*

менша на $\sim 46\%$ щільність дислокацій внаслідок активного протікання процесів полігонізації і рекристалізації *in-situ* в ході деформації. При цьому середні значення мікропорушень кристалічної ґратки фериту на 21% нижче в зразках, отриманих способом несиметричної прокатки ніж у зразках, отриманих традиційною прокаткою. Тобто ґратка фериту у зразках, отриманих традиційною прокаткою більш деформована ніж у зразках, отриманих способом несиметричної прокатки.

5. Вперше встановлено, що значення швидкості атмосферної корозії (з кисневою деполяризацією) менше у зразках, які були піддані способу гарячої несиметричної сортової прокатки ($0,39 \text{ г/м}^2\text{хгод}$) ніж у зразках, які були піддані традиційної гарячої сортової прокатці ($0,445 \text{ г/м}^2\text{хгод}$).

Библиографический список

1. Грудев А.П. Теория прокатки: Учебник для вузов // М.: Металлургия, 1988. – 240 с.
2. Васильев М.А., Прокопенко Г.И., Филатова В.С. Нанокристаллизация металлических поверхностей методами интенсивной пластической деформации // Успехи физ. мет. – 2004. – Т.5. – №3. – С. 345-399. <https://doi.org/10.15407/ufm.05.03.345>
3. Лякишев Н.П., Алымов М.И. Получение и физико-механические свойства объемных нанокристаллических материалов // М.: Изд-во ЭЛИЗ, 2007. – 148 с.
4. Валиев Р.З., Александров И.В. Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией // М.: Логос, 2000. – 272 с.
5. Лесюк Е.А. Технология получения нанокристаллической структуры в поверхностных слоях массивных деталей из конструкционных и инструментальных сталей // Технология металлов. – 2008. – №7. – С. 29-35.
6. Забелин С.Ф. Технологии поверхностной нанокристаллизации металлов и сплавов / С.Ф. Забелин, А.А. Васильев, А.А. Дорожков, А.А. Феофанов // Ученые записки ЗабГГПУ. – 2015. – №2. – С. 36-44.
7. Никитенко О.А. Формирование ультрамелкозернистой структуры углеродистой стали в процессе горячей пластической деформации / О.А. Никитенко, Ю.Ю. Ефимова, М.С. Жеребцов, Е.С. Селиванова // Инновационные технологии в машиностроении и материаловедении: сб. тезисов 2-ой научно-практической конференции с международным участием, Пермь, 29 сен.-3 окт., 2014. – С. 96-100.
8. Kawalek Anna, Henrik Dyja Анализ изменений сил и моментов несимметричной плоской прокатки // Вестник МГТУ. – 2013. – № 5. – С.28-33.
9. Найзабеков А.Б. О реализации интенсивных пластических деформаций при прокатке в калибрах / А.Б. Найзабеков, Б.Б. Быхин, К.А. Ногаев, М.Б. Быхин // Sci. and world. – 2014. – №10. – Ч. 1. – С. 45-49.
10. Mekhtiev A.D. Влияние несимметричной прокатки в конических валках на микроструктуру низкоуглеродистой стали / A.D. Mekhtiev, E.M. Azbanbaev,

- A.Z. Sagulov [et al.] // *Metalurgija* (Zagreb). – 2015. – Vol. 54. – №4. – S. 623-626.
11. Пат. 25313337. Российская Федерация, МПК B21В 1/00 (2006.01). Способ асимметричной прокатки металла / А.М. Песин, А.П. Ткаченко, Д.О. Пустовойтов, Н.М. Локотунина, М.А. Бирюков, Н.А. Горкин, заявитель и патентообладатель ЧерметИнформСистемы. – №2013111708/02; заявл. 15.03.2013; опубл. 20.10.2014.
 12. Пат. 2518028. Российская Федерация, МПК B21В 13/10 (2006.01). Рабочая клетка стана для прокатки профилей в калибре / А.М. Песин, А.П. Ткаченко, Д.О. Пустовойтов, Н.М. Локотунина, М.А. Бирюков, В.В. Курбан, заявитель и патентообладатель ЧерметИнформСистемы. – №2013104893/02; заявл. 05.02.2013; опубл. 10.06.2014.
 13. Пат. 2518358. Российская Федерация, МПК B21В 13/10 (2006.01). Рабочая клетка стана для прокатки профилей в калибре / А.М. Песин, А.П. Ткаченко, Д.О. Пустовойтов, Н.М. Локотунина, М.А. Бирюков, В.В. Курбан, заявитель и патентообладатель ЧерметИнформСистемы. – №2013104846/02; заявл. 05.02.2013; опубл. 10.06.2014.
 14. Liu Gang. Нанокристаллизация поверхности кремнистой стали в зависимости от параметров несимметричной прокатки / Liu Gang, Ma Ye, Zhang Ruijun, Wang Xiaolan [et al.] // *Acta met. sin.* – 2014. – Vol. 50. – №9. – PP. 1071-1077.
 15. Скляр В.О. Инновационные и ресурсосберегающие технологии в металлургии. Учебное пособие. // Донецк: ДонНТУ, 2014. – 224 с.
 16. Покрытия металлические и неметаллические. Методы ускоренных коррозионных испытаний: ГОСТ 9.308-85. // М.: Изд-во стандартов, 1986. – 20 с.
 17. Единая система защиты от коррозии и старения. Металлы, сплавы, покрытия металлические. Методы удаления продуктов коррозии после коррозионных испытаний : ГОСТ 9.907-2007 (ISO 8407:1991). // М.: СТАНДАРТИНФОРМ, 2008. – 19 с.
 18. Жучков С.М., Лохматов А.П., Кулаков Л.В. Оптимизация расхода энергии при непрерывной сортовой прокатке // К.: Наукова думка, 2008. – 191 с.
 19. Жучков С.М., Кулаков Л.В., Лохматов А.П. Управление температурным режимом непрерывной сортовой прокатки (Теоретические и технологические основы) // М.: Теплотехник, 2008. – 144 с.
 20. Пашинская Е.Г., Завдовеев А.В. Применение прокатки со сдвигом и традиционного волочения для формирования структуры и свойств малоуглеродистых сталей // *Физика и техника высоких давлений.* – 2012. – Т.22. – №3. – С. 1-12.
 21. Паламар Д.Г. Розробка спрощеного методу оцінки деформаційного опрацювання центральних зон перерізу розкату з безперервною заготовки при прокатці у калібрах / Д.Г. Паламар, С.О. Воробей, С.В. Єршов, В.Г. Раздобреєв, І.Ю. Приходько // Зб. наукових праць Дніпровського Державного Технічного Університету. Кам'янське: ДДТУ, 2018. – С. 74-83.
 22. Гринев В.Н., Гаврилюк В.Г., Мешков Ю.Я. Прочность и пластичность холоднодеформированной стали // К.: Наукова думка, 1974. – 232 с.

23. *Кайбышев О.А., Утяшев Ф.З.* Сверхпластичность, измельчение микроструктуры и обработка труднодеформируемых сплавов // М.: Наука, 2002. – 438 с.
24. *Трефилов В.И., Моисеев В.Ф., Печковский Э.П. и др.* Деформационное упрочнение и разрушение поликристаллических материалов // К.: Наукова Думка, 1989. – 256 с.
25. *Кайбышев О.А.* Научные основы, достижения и перспективы сверхпластической деформации // Уфа: Гилем, 2000. – 150 с.
26. *Добаткин С.В., Капуткина Л.М.* Карты структурных состояний для оптимизации режимов горячей деформации сталей // Физика металлов и металловедение. – 2001. – Т. 91. – № 1. – С. 79-89.
27. *Костина М.В., Дымов А.В., Блинов В.М.* Влияние пластической деформации на структуру и свойства высокоазотистых сплавов системы Fe-Cr // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2002. – № 1. – С. 1-7.
28. *Ahmonri A., Torizuka S., Nagai K.* Evolution of ultrafine-grained ferrite structure through multi-pass warm caliber rolling // Journal of the Iron and Steel Institute of Japan. – 2003. – Vol. 89. – № 7 – P. 781-788.
https://doi.org/10.2355/tetsutohagane1955.89.7_781

References

1. Grudev A.P. (1988). *Teoriya prokatki: Uchebnik dlya vuzov [Rolling theory: Textbook for universities]*. Moskva: Metallurgiya, 1988, 240 p. (In Russian).
2. Vasil'yev M.A., Prokopenko G.I. & Filatova V.S. (2004). Nanokristallizatsiya metallicheskih poverkhnostey metodami intensivnoy plasticheskoy deformatsii [Nanocrystallization of metal surfaces by methods of severe plastic deformation]. *Uspekhi fiz. met. [Progress in Physics of Metals]*, 2004, Vol.5, 3, 345-399. (In Russian). <https://doi.org/10.15407/ufm.05.03.345>
3. Lyakishev N.P. & Alymov M.I. (2007). *Polucheniye i fiziko-mekhanicheskiye svoystva ob'yemnykh nanokristallicheskih materialov [The preparation and physico-mechanical properties of bulk nanocrystalline materials]*. Moskva: Izd-tvo ELIZ, 2007, 148 p. (In Russian).
4. Valiyev R.Z. & Aleksandrov I.V. (2000). *Nanostrukturnyye materialy, poluchennyye intensivnoy plasticheskoy deformatsiyey [Nanostructured materials obtained by severe plastic deformation]*. Moskva: Logos, 2000, 272 p. (In Russian).
5. Lesyuk Ye.A. (2008). Tekhnologiya polucheniya nanokristallicheskoy struktury v poverkhnostnykh sloynakh massivnykh detaley iz konstruktivnykh i instrumental'nykh staley [Technology of obtaining a nanocrystalline structure in the surface layers of massive parts from structural and tool steels]. *Tekhnologiya metallov [Metal technology]*, 2008, 7, 29-35. (In Russian).
6. Zabelin S.F., Vasil'yev A.A., Dorozhkov A.A. & Feofanov A.A. (2015). Tekhnologii poverkhnostnoy nanokristallizatsii metallov i splavov. [Technologies of surface nanocrystallization of metals and alloys]. *Uchenyye zapiski ZabGGPU [Scientific notes of the Transbaikal SU]*. 2015, 2, 36-44. (In Russian).
7. Nikitenko O.A., Yefimova Yu.Yu., Zharebtsov M.S. & Selivanova Ye.S. (2014). Formirovaniye ul'tramelkozernistoy struktury uglerodistoy stali v protsesse goryachey plasticheskoy deformatsii. [Formation of ultrafine-grained structure of

- carbon steel in the process of hot plastic deformation]. *Innovatsionnyye tekhnologii v mashinostroyenii i materialovedenii: sb. tezisev 2-oy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem (29 sen.-3 okt. 2014) [Innovative technologies in mechanical engineering and materials science: collection of articles. abstracts of the 2nd scientific-practical conference with international participation]*. Perm', 2014, 96-100. (In Russian).
8. Kawalek Anna & Henrik Dyja (2013). Analiz izmeneniy sil i momentov nesimmetrichnoy ploskoy prokatki [Analysis of changes in forces and moments of asymmetric flat rolling]. *Vestnik MGTU [Vestnik of MSTU]*, 2013, 5, S.28-33. (In Russian).
 9. Nayzabekov A.B., Bykhin B.B., Nogayev K.A. & Bykhin M.B. (2014). O realizatsii intensivnykh plasticheskikh deformatsiy pri prokatke v kalibrakh. [On the implementation of intense plastic deformations during rolling in calibers]. *Sci. and world*, 2014, Vol.10, 1, 45-49. (In Russian).
 10. Mekhtiev A.D., Azbanbaev E.M. & Sagulov A.Z. et al. (2015). Vliyaniye nesimmetrichnoy prokatki v konicheskikh valkakh na mikrostrukturu nizkouglerodistoy stali [Influence of asymmetric rolling in tapered rolls on the microstructure of low-carbon steel]. *Metalurgiya [Metallurgy]*. Zagreb, 2015, Vol. 54, 4, 623-626. (In Russian).
 11. Pesin A.M., Tkachenko A.P., Pustovoytov D.O., Lokotunina N.M., Biryukov M.A., & Gorkin N.A. *Sposob asimmetrichnoy prokatki metalla [Method of asymmetric metal rolling]*. RF Patent 25313337, (2006) ChermetInformSistemy. (In Russian).
 12. Pesin A.M., Tkachenko A.P., Pustovoytov D.O., Lokotunina N.M., Biryukov M.A., & Kurban V.V. *Rabochaya klet' stana dlya prokatki profiley v kalibre [Working stand of the mill for rolling profiles in caliber]*. RF Patent 2518028 (2006), ChermetInformSistemy. (In Russian).
 13. Pesin A.M., Tkachenko A.P., Pustovoytov D.O., Lokotunina N.M., Biryukov M.A., & Kurban V.V. *Rabochaya klet' stana dlya prokatki profiley v kalibre [Working stand of the mill for rolling profiles in caliber]*. RF Patent 2518358 (2006), ChermetInformSistemy. (In Russian).
 14. Liu Gang, Ma Ye, Zhang Ruijun & Wang Xiaolan et al. (2014). Nanokristallizatsiya poverkhnosti kremnistoy stali v zavisimosti ot parametrov nesimmetrichnoy prokatki [Nanocrystallization of the surface of silicon steel depending on the parameters of asymmetric rolling]. *Acta met. sin.*, 2014, Vol. 50, 9, 1071-1077. (In Russian).
 15. Sklyar V.O. (2014). *Innovatsionnyye i resursoberegayushchiye tekhnologii v metallurgii. Uchebnoye posobiye [Innovative and resource-saving technologies in metallurgy. Tutorial.]*. Donetsk: DonNTU, 2014, 224 p. (In Russian).
 16. Pokrytiya metallicheskiye i nemetallicheskiye. Metody uskorennykh korrozionnykh ispytaniy [Coverings metallic and non-metallic. Accelerated corrosion test methods]. (1986). GOST 9.308-85, 1986, 20 p. (In Russian).
 17. Yedinaya sistema zashchity ot korrozii i stareniya. Metally, splavy, pokrytiya metallicheskiye. Metody udaleniya produktov korrozii posle korrozionnykh ispytaniy [Unified system of corrosion and ageing protection. Metals, alloys, metallic coatings. Methods for removal of corrosion products after corrosion tests]. (2008). GOST 9.907-2007 (ISO 8407:1991), 2008, 19 p. (In Russian).

18. Zhuchkov S.M., Lokmatov A.P. & Kulakov L.V. (2008). *Optimizatsiya raskhoda energii pri nepreryvnoy sortovoy prokatke [Optimization of energy consumption during continuous section rolling]*. Kiev: Naukova dumka, 2008, 191 p. (In Russian).
19. Zhuchkov S.M., Kulakov L.V. & Lokmatov A.P. (2008). *Upravleniye temperaturnym rezhimom nepreryvnoy sortovoy prokatki (Teoreticheskiye i tekhnologicheskiye osnovy) [Temperature control of continuous section rolling (Theoretical and technological foundations)]*. Moskva: Teplotekhnika, 2008, 144 p. (In Russian).
20. Pashinskaya Ye.G. & Zavdoveyev A.V. (2012). *Primeneniye prokatki so sdvigom i traditsionnogo volocheniya dlya formirovaniya struktury i svoystv malouglerodistykh staley [Application of shear rolling and traditional drawing for the formation of structure and properties of low-carbon steels]. Fizika i tekhnika vysokikh davleniy [Physics and high pressure technology]*, 2012, Vol.22, 3, 1-12. (In Russian).
21. Palamar D.H, Vorobey S.O., Yershov S.V., Razdobryeyev V.H. & Prykhod'ko I.Yu. (2018). *Rozrobka sproshchenoho metodu otsinky deformatsiynoho opratsyuvannya tsentralnykh zon pererizu rozkatu z bezperervnolytoyi zahotovky pry prokattsi u kalibrakh. [Development of the deformation processing of the central zones based on the method of evaluation of the deformation processing of the central zones by rolling out the workpiece without interruption during rolling at calibers]. Zb. naukovykh prats Dniprovskoho Derzhavnoho Tekhnichnoho Universytetu [Collection of scientific works of the Dnieper State Technical University]*. Kamyanske: DDTU, 2018, 74-83. (in Ukrainian).
22. Gridnev V.N., Gavrilyuk V.G. & Meshkov Yu.Ya. (1974). *Prochnost' i plastichnost' kholodnodeformirovannoy stali [Strength and plasticity of cold-worked steel]*. Kiev: Naukova dumka, 1974, 232 p. (In Russian).
23. Kaybyshv O.A. & Utyashev F.Z. (2002). *Sverkhplastichnost', izmel'cheniye mikrostruktury i obrabotka trudnodeformiruyemykh splavov [Superplasticity, microstructure refinement and processing of hard-to-form alloys]*. Moskva: Nauka, 2002, 438 p. (In Russian).
24. Trefilov V.I., Moiseyev V.F. & Pechkovskiy E.P. et al. (1989). *Deformatsionnoye uprochneniye i razrusheniye polikristallicheskikh materialov [Deformation hardening and destruction of polycrystalline materials]*. Kiev: Naukova Dumka, 1989, 256 p. (In Russian).
25. Kaybyshv O.A. (2000). *Nauchnyye osnovy, dostizheniya i perspektivy sverkhplasticheskoy deformatsii [Scientific foundations, achievements and prospects of superplastic deformation]*. Ufa: Gilem, 2000, 150 p. (In Russian).
26. Dobatkin S.V. & Kaputkina L.M. (2001). *Karty strukturnykh sostoyaniy dlya optimizatsii rezhimov goryachey deformatsii staley [Structural state maps for optimization of hot deformation modes of steels]. Fizika metallov i metallovedeniye [The Physics of Metals and Metallography]*. 2001, Vol. 91, 1, 79-89. (In Russian).
27. Kostina M.V., Dymov A.V. & Blinov V.M. (2002). *Vliyaniye plasticheskoy deformatsii na strukturu i svoystva vysokoazotistykh splavov sistemy Fe-Cr [Influence of plastic deformation on the structure and properties of high-nitrogen*

- alloys of the Fe-Cr system]. *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov [Metal Science and Heat Treatment]*. 2002, 1, 1-7. (In Russian).
28. Ahmonri A., Torizuka S. & Nagai K. (2003). Evolution of ultrafine-grained ferrite structure through multi-pass warm caliber rolling. *Jornal of the Iron and Steel Institute of Japan*. 2003, Vol. 89, 7, 781-788. <https://doi.org/10.2355/tetsutohagane1955.89.7> 781

В.Г. Раздобреев, к.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0001-7402-7992

Д.Г. Паламарь, м.н.с., ORCID 0000-0002-9503-3248

Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины

Исследование влияния горячей несимметричной сортовой прокатки на формирование микроструктуры, механических свойств и служебных характеристик готового проката

Аннотация. Целью работы является исследование влияния процесса горячей несимметричной прокатки на структурное состояние, механические свойства и эксплуатационные характеристики сортового проката простой формы из рядовой углеродистой стали. Для моделирования процесса несимметричной сортовой прокатки в ранее разработанную в ИЧМ математическую модель были добавлены возможности учета случаев прокатки в паре валков разного диаметра, прокатки в паре валков из разного материала, прокатки с одним приводным и одним неприводными валками, прокатка с различными скоростями в паре валков и др. Расчеты показали снижение силы прокатки до 10 % при несимметричном процессе прокатки по сравнению с традиционным процессом прокатки. Исследование особенностей процесса горячей несимметричной прокатки (прокатка со сдвигом) по сравнению с традиционным процессом прокатки проводили в промышленных условиях при производстве квадратного профиля 12x12 мм из рядовой низкоуглеродистой стали СтЗсп. Установлено, что средние значения HRB, σ_B и σ_T в исследованных образцах практически не отличаются, а средние показатели δ_5 выше на 8% (абс.) или на ~ 27% (отн.) в образцах, которые были прокатаны по технологии несимметричной прокатки, чем в образцах, которые были прокатаны по технологии традиционной прокатки. Оценка плотности дислокаций с помощью рентгеноструктурного метода показала, что во время горячей несимметричной прокатки фиксируется меньше на ~ 46% плотность дислокаций в результате активного протекания процессов полигонизация и рекристаллизации *in-situ* в ходе деформации. При этом средние значения микронарушений кристаллической решетки феррита на 21% ниже в образцах, полученных способом несимметричной прокатки, чем в образцах, полученных традиционной прокаткой. Впервые установлено снижение суммарной скорости атмосферной коррозии в образцах, которые были прокатаны по технологии несимметричной прокатки (0,39 г/м²хч) по сравнению с образцами, которые были прокатаны по технологии традиционной прокатки (0,445 г/м²хч).

Ключевые слова: горячая несимметричная сортовая прокатка, традиционная прокатка, микротвердость, твердость, механические свойства, скорость атмосферной коррозии

V.G. Razdobreev, PhD (Engin.), Senior Researcher, ORCID 0000-0001-7402-7992

D.G. Palamar, Junior Researcher (Engin.), ORCID 0000-0002-9503-3248

Iron and Steel Institute named after Z.I. Nekrasov of the NAS of Ukraine

Investigation of the influence of hot asymmetric long products on the formation of the microstructure, mechanical properties and service characteristics of finished products

Summary. The aim of the work is to study the influence of the process of hot asymmetric rolling on the structural state, mechanical properties and operational characteristics of long products of simple form from ordinary carbon steel. To simulate the process of asymmetric high-quality rolling, the mathematical model previously developed in the ISI added the possibility of taking into account cases of rolling in a pair of rolls of different diameters, rolling in a pair of rolls of different materials, rolling with one drive and one non-drive rolls, rolling at different speeds in a pair of rolls and other. The calculations showed a reduction in rolling force to 10 % with an asymmetric rolling process compared to the traditional rolling process. The study of the features of the process of hot asymmetric rolling (shear rolling) compared with the traditional rolling process was carried out under industrial conditions in the production of a 12x12 mm square profile from ordinary low-carbon steel St3sp. It was found that the average values of HRB, σ_B , and σ_T in the studied samples practically do not differ, and the average values of δ_5 are higher by 8 % (abs.) or ~ 27 % (rel.) In samples that were rolled using the asymmetric rolling technology than in samples that were rolled using traditional rolling technology. The estimation of dislocation density by the X-ray diffraction method showed that during hot asymmetric rolling, the dislocation density is reduced by $\sim 46\%$ due to the active flow of *in-situ* polygonization and recrystallization processes during deformation. In this case, the average values of the microfractures of the crystalline lattice of ferrite are 21% lower in the samples obtained by the method of asymmetric rolling than in the samples obtained by traditional rolling. For the first time, a decrease in the total atmospheric corrosion rate was found in samples that were rolled using asymmetric rolling technology ($0.39 \text{ g/m}^2\text{h}$) compared to samples that were rolled using traditional rolling technology ($0.445 \text{ g/m}^2\text{h}$).

Keywords: asymmetric hot rolling, traditional rolling, microhardness, hardness, mechanical properties, atmospheric corrosion rate

For citation: Razdobrev V.H., Palamar D.H. Doslidzhennya vplyvu haryachoyi nesymetrychnoyi sortovoyi prokatky na formuvannya mikrostruktury, mekhanichnykh vlastyivostey ta sluzhbovykh kharakterystyk hotovoho prokatu. [Investigation of the influence of hot asymmetric rolling on the formation of microstructure, mechanical properties and performance characteristics of finished products.]. *«Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii»*. [Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy] 2020, 34. 156-172. (In Ukrainian) DOI 10.52150/2522-9117-2019-33-156-172

Статья поступила в редакцию сборника 11.09.2019 года, прошла внутреннее и внешнее рецензирование (Протокол заседания редакционной коллегии сборника №2 от 23 декабря 2019 года)

«Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. – 2019. - Вып.33
«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33
ISSN 2522-9117 «Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii». – 2019. – Vypusk 33

И.Ю. Приходько, д.т.н., с.н.с., зав. отделом, ORSID 0000-0001-5651-8106

М.А. Дедик, н.с., ORSID 0000-0001-8585-896X

Институт черной металлургии НАН Украины им. З.И. Некрасова

Стефан Брандт, Швеция, консультант,

К.А.Гогаев, член-корр. НАНУ, д.т.н., зав. отделом, ORSID 0000-0002-0304-2535

А.И. Иценко, к.т.н., с.н.с.

В.С.Воропаев, к.т.н., с.н.с., ORSID 0000-0001-7408-5957

Институт проблем материаловедения им. И.Н. Францевича

КОМПЛЕКСНОЕ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПРОИЗВОДСТВА ТИТАНОВЫХ ПОЛОС НЕСИММЕТРИЧНОЙ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКОЙ ПОРОШКА С ПОСЛЕДУЮЩИМ СПЕКАНИЕМ

Аннотация. Реализовано конечно-элементное численное моделирование и выполнено исследование процессов производства тонких титановых полос на основе рассмотрения двух ключевых последовательных процессов: несимметричной прокатки порошка и спекания прокатанного изделия с применением модели Бранда-Нильсона. Приведены результаты исследования процессов уплотнения и спекания порошка титана с помощью единой математической модели, предложенной Яном Брандтом. Для расчетов использованы экспериментально определенные напряжения чистого сдвига и объемного модуля сжатия при гидростатическом сжатии и одноосном сжатии. Условия трения между поверхностями валков и порошком определялись как функция изменения кулоновского коэффициента трения от относительной скорости скольжения поверхностей вала и заготовки. Анализ результатов позволяет количественно оценить влияние параметров технологии процессов уплотнения и спекания на изменение напряженного состояния и относительной плотности в объеме изделий на стадиях процессов производства. Показано, что применение диаграмм изменения плотности и напряжений по Мизесу для коррекции режима спекания позволит избежать появления дефектов (недостаточно однородная плотность спеченного материала и наличия микротрещин) при интенсивном нагревании металла в печи. Разработка режимов спекания на основе модели Бранда-Нильсона упрощает совершенствование технологии при спекании объемных тел, что является более трудоемким процессом, чем спекание тонких пластин. Данная модель может применяться при разработке режимов спекания различных материалов, так как учитывает влияние основных явлений в этом процессе. Варьированием параметров технологии

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2019. - Вип.33

«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33

ISSN 2522-9117 «Fundamental'nye i prikladnye problemy černojo metallurgii». – 2019. – Vypusk 33

возможно достигать целенаправленных воздействий на показатели качества изделий и предотвращать образование в них микротрещин.

Ключевые слова: несимметричная прокатка порошка, спекание, титан.

Ссылка для цитирования: Приходько И.Ю., Дедик М.А., Стефан Брандт, Гогаев К.А., Иценко А.И., Воронаев В.С. Комплексное конечно-элементное исследование процессов производства титановых полос методами несимметричной холодной прокатки порошка с последующим спеканием. //«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2019. - Вып.33. – С.173-192. (In Russian). DOI 10.52150/2522-9117-2019-33-173-192

Введение. Для достижения высокой прочности и уменьшения себестоимости деталей из твердых (карбид вольфрама) или высокопрочных (титан) металлов используются процессы порошковой металлургии, такие как уплотнение порошков и их спекание.

Спекание, как технология, была известна еще в доисторическую эпоху, как обжигание керамических изделий. Но производство металлических деталей путем спекания было возможно после 1940-х годов только после начала фундаментального изучения данного процесса с научной точки зрения [1]. Разумным представляется совместное рассмотрение и изучение этих двух процессов – уплотнение и спекание [2].

Математическая модель сопротивления деформации порошка титана в процессе несимметричной прокатки

Модель Бранда-Нильсона (БН) [3] позволяет моделировать два процесса – уплотнение порошка и последующее его спекание. На данном этапе изучали уплотнение, где поверхность нагружения описывается уравнениями:

$$\sigma_y(d) = \begin{cases} C_0(d) - C_1(d)J_1 - C_2(d)J_1^2 & \text{при } J_1 \geq LX(d) \\ \sqrt{\frac{[(L-1)X(d)]^2 - [(J_1 - LX(d))]^2}{R}} & \text{при } J_1 < LX(d) \end{cases} \quad (1)$$

Коэффициенты C_0 , C_1 и C_2 в уравнении (1) определяются при $J_1 = LX(d)$ для обеспечения прочности порошка при одноосном сжатии.

Модель уплотнения порошка предполагает разделение деформации на пластическую и упругую части, как и в модели Друккера-Праггера (ДП).

Модель БН, как и ДП, учитывает поверхности разрушения и уплотнения, а также, кроме этого, – изотропное, анизотропное и кинематическое упрочнения и условие течения.

Вводится тензор компактности $\hat{P}$ для отображения начальной конфигурации плотности порошка по все трем направлениям:

$$\hat{P} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

и, следовательно, относительная плотность d рассчитывается по формуле

$$d = \det \hat{P} = \frac{\rho_0}{\rho}, \quad (3)$$

Упругие свойства порошка задаются в виде зависимости от относительной плотности (модуль объемного сжатия). Поверхность нагружения (рис. 1) ограничена на сжатие и растяжение.

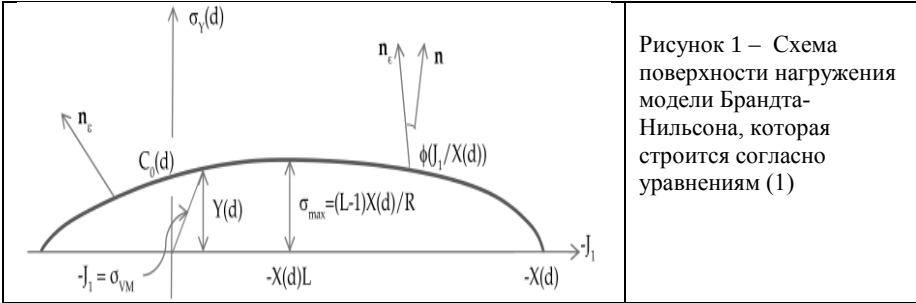


Рисунок 1 – Схема поверхности нагружения модели Брандта-Нильсона, которая строится согласно уравнениям (1)

Изменение пластической деформации происходит, согласно неассоциированному закону течения, и задается направлением приращения:

$$\mathbf{n}_\varepsilon = \begin{pmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi \\ \sin \varphi & \cos \varphi \end{pmatrix} \mathbf{n}, \quad (4)$$

где

$$\mathbf{n} = \frac{\sigma_y(d)}{\sigma_{max}} \left(\frac{\partial \sigma_y}{\partial J_1} \right), \quad (5)$$

$\mathbf{n}$ - нормаль к поверхности текучести, как показано на рис. 1. Угол φ определяется только при положительных значениях относительного объемного напряжения $J_1/X(d) > 0$, при отрицательных значениях угол определяется внутри поверхности для обеспечения гладкости кривой пластического течения и устранения численных проблем при решении.

Изменение тензора компактности напрямую связано с изменением пластического течения и записывается в виде:

$$\hat{P} = -\frac{1}{2} (\hat{\varepsilon}_p P + P \hat{\varepsilon}_p). \quad (6)$$

Тензор обратных напряжений (упрочнение упругой части поверхности нагружения) определяется:

$$\mathbf{k} = J_1 H(e) \left(\mathbf{P} - \frac{Tr(\mathbf{P})}{3} \mathbf{I} \right), \quad (7)$$

где e - показатель интенсивности анизотропии. Он принимает значение от 1 до 2 и изменяется в зависимости от пластической деформации и работы пластической деформации:

$$\dot{e} = c_a \sqrt{\frac{1}{2} \dot{\varepsilon}_p^d : \dot{\varepsilon}_p^d} - c_v J_1 \dot{\varepsilon}_p^m W(d, J_1) + c_d \dot{\varepsilon}_p^d : \sigma W(d, J_1), \quad (8)$$

где работа пластичности $W(d, J_1)$, которая определяется:

$$W(d, J_1) = - \left[\frac{J_1}{X(d)} \right]^p \int_{d_0}^d \frac{X(\xi)}{3\xi} d\xi, \quad (9)$$

где d_0 начальная относительная плотность.

В табл. 1 приведены обозначения и значения параметров уплотнения Брандта-Нильсона для порошка титана.

Таблица 1 – Параметры модели уплотнения Брандта-Нильсона для порошка титана

Параметр	Обозначение	Значение
Начальная плотность, кг/м ³	ρ_0	1450
Коэффициент Пуассона	ν	0,2
Коэффициент начальной анизотропии	e	1
Начальная относительная плотность	d_0	0,32
Коэффициент определения купольной части	L/X	0,75
Коэффициент определения купольной части	R	1
Коэффициент пластической сдвиговой деформации	c_a	$1,0 \cdot 10^{-8}$
Коэффициент пластической девиаторной работы	c_d	$1,0 \cdot 10^{-8}$
Коэффициент пластической объемной работы	c_v	$1,0 \cdot 10^{-8}$
Экспоненциальный коэффициент	p	0,0001

Экспериментально определены напряжения как функции от относительной плотности при гидростатическом сжатии (рис. 2, а), одноосном сжатии (рис. 2, б), напряжения чистого сдвига (рис. 3), а также объемный модуль сжатия (рис. 4) [4-5].

Кривые на рис. 2–4 определяют коэффициенты уравнений (1), по которым строится поверхность нагружения.

На рис. 5 представлена функция масштабирования $H(e)$ для обратных напряжений (7) в зависимости от изменения коэффициента интенсивности анизотропии пластической деформации.

Приращение пластической деформации происходит по закону течения через направление нормали с углом смещения, который определяется экспериментально как функция от J_1/X (рис. 6, зависимости (4-5)).

Условие трения между поверхностями валков и порошком определялось как функция изменения кулоновского коэффициента трения от относительной скорости скольжения поверхностей валка и заготовки (7), согласно закону [8]:

$$f = f_d + (f_s - f_d)e^{-d|V_{rel}|}, \quad (10)$$

где f_s и f_d – динамический и статический коэффициенты трения, d – коэффициент сглаживания, V_{rel} – относительная скорость поверхностей валка и порошка.



Рисунок 2 – Напряжения в порошке титана при экспериментах на гидростатическое (а) [4] и одноосное (б) [5] сжатия как функции от относительной плотности

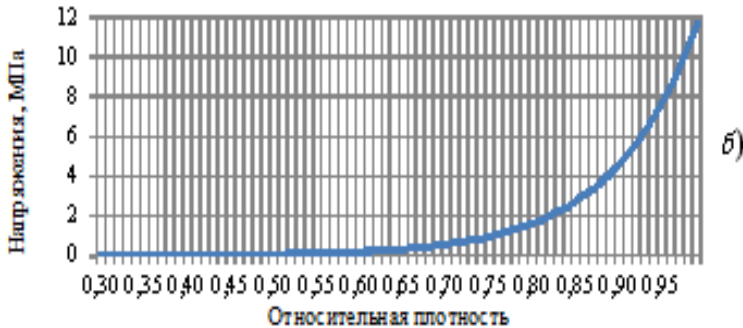


Рисунок 3 – Напряжения в порошке титана при эксперименте на чистый сдвиг как функция от относительной плотности [6]



Рисунок 4 – Объемный модуль сжатия порошка титана в зависимости от разной относительной плотности [4]

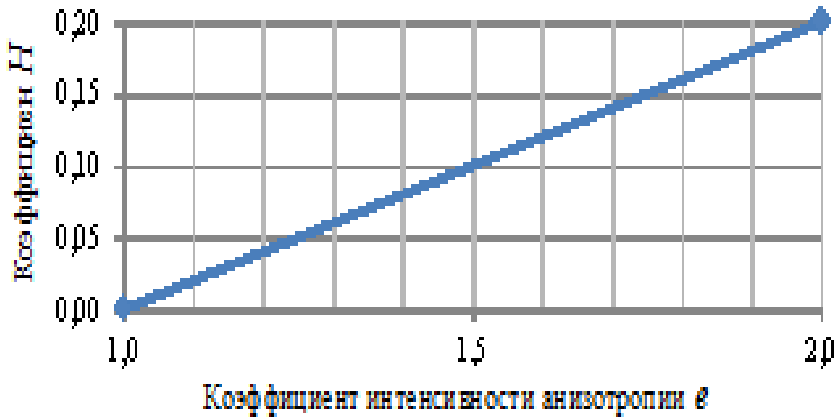


Рисунок 5 – Функция масштабирования $H(\epsilon)$ для обратных напряжений в уравнении (7) [7]

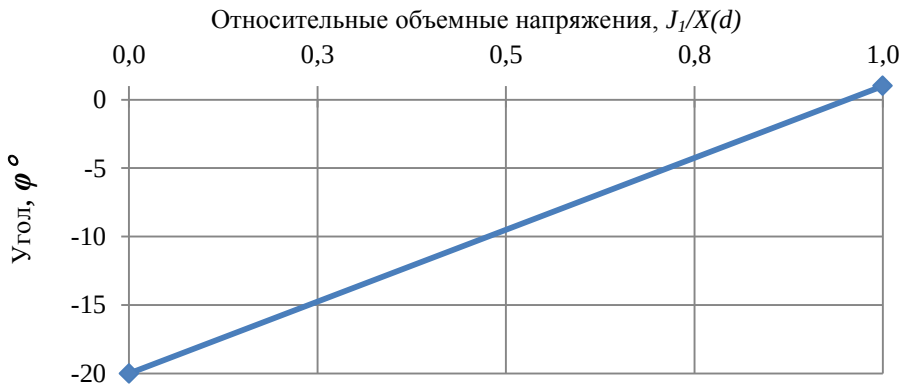


Рисунок 6 – Угол изменения направления пластических деформаций, как функция $\varphi(J_1/X(d))$ от относительных объемных напряжений [7]

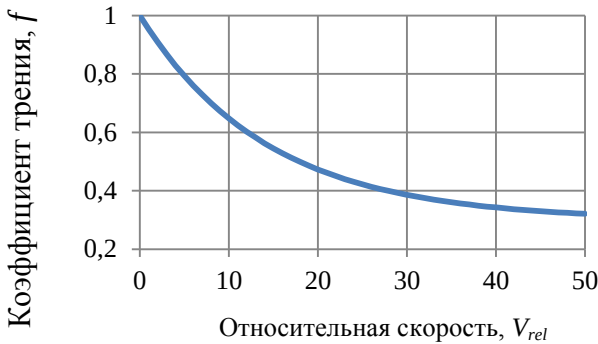


Рисунок 7 –
Изменение
коэффициента трения
по зависимости (10).
Параметры
уравнения (10):
 $f_d = 0,3$; $f_s = 1$; $d = 0,07$

Рис. 7 – Изменение коэффициента трения по зависимости (10)

Из рис. 7 следует, что когда относительная скорость между валком и заготовкой равна нулю, то коэффициент трения покоя (коэффициент сцепления) равен единице. Обычно эффект сцепления возникает в начале зоны уплотнения и в очаге деформации, когда возникает опережение или отставание.

Математическая модель спекания титановых полос

Уплотнение титанового порошка в процессе спекания происходит и после предварительной обработки его давлением в процессе несимметричной прокатки. Математическая модель, описывающая процесс спекания, разработана на основе теорий диффузионной Френкеля и свободного объема Козна-Турнбулла [9].

Модель спекания состоит из тепловой и вязкоупругой частей и определяется через девиаторные и средние напряжения [2-3]:

$$\dot{\sigma}^m = 3K^s(\dot{\varepsilon}^m - \dot{\varepsilon}_T - \dot{\varepsilon}_p^m) \quad (11)$$

Скорость тепловой деформации пропорциональна коэффициенту теплового расширения $\alpha = 9 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$:

$$\dot{\varepsilon}_T = \alpha \dot{T} \quad (12)$$

Объемный модуль упругости K^s при спекании определяется так же, как и в модели уплотнения:

$$K^s = f_{ks}(T)K(d), \quad (13)$$

где f_{ks} - функция масштабирования объемного модуля упругости в зависимости от температуры, определяемая по формуле:

$$f_{ks} = 1 - T/T_{\text{плавления}} \quad (14)$$

где $T_{\text{плавления}} = 1668 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Скорость пластической деформации описывается законом:

$$\dot{\epsilon}_p = \frac{1}{2G^v} \sigma^d + \frac{1}{3K^v} (\sigma^m - \sigma^s) \dot{\epsilon} \quad (15)$$

где σ_s – напряжение спекания, K_v – объемный модуль вязкости, G_v – вязкость модуля сдвига.

Наибольшее внимание при анализе модели спекания уделялось определению объемного модуля вязкости K_v , так как его изменение зависит от трех составляющих: изменение плотности, диффузионных процессов, а также скорости нагрева (описание и значения параметров приведены в табл. 2, а их зависимости от относительной плотности температуры – на рис. 8-9):

$$\frac{1}{K^v} = 3f_k(d) \left\{ d_{v1} \exp\left(-\frac{d_{v2}}{R_{gas}(T - T_0)}\right) + d_{s1} \exp\left(-\frac{d_{s2}}{R_{gas}(T - T_0)}\right) \right\} [1 + f_{s2}(T)\xi] \quad (16)$$

Таблица 2 – Значения констант из уравнения (16) [10]

Параметр	Значение	Параметр	Значение
Коэффициент объемной диффузии, d_{v1}	$5 \times 10^{-3} \text{ м}^3/\text{сек}$	Коэффициент поверхностной диффузии, d_{s1}	$2.5 \times 10^{-12} \text{ м}^2/\text{сек}$
Энергия активации для объемной диффузии, d_{v2}	267 кДж/моль	Энергия активации для поверхностной диффузии, d_{s2}	220 кДж/моль

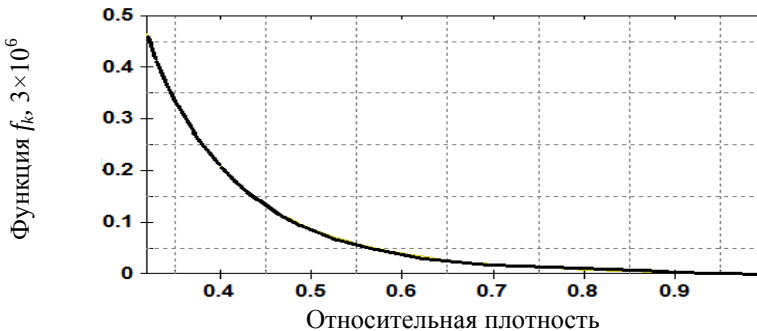


Рис. 8 – Функция f_k масштабирования модуля вязкости при разной плотности титана (из уравнения (14))

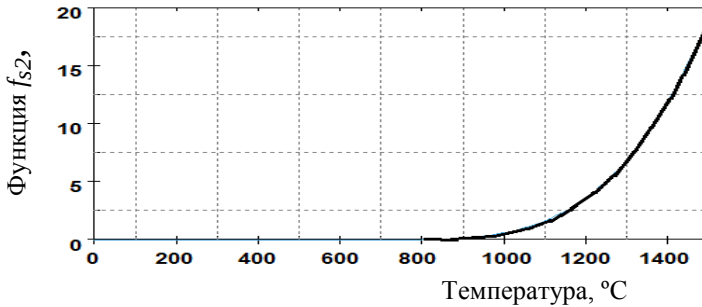


Рис. 9 – функция f_{s2} (из уравнения 16), определяет подвижность зерен при разной температуре, основываясь на теории свободного объема Козна и Турнбула (1959) [9]

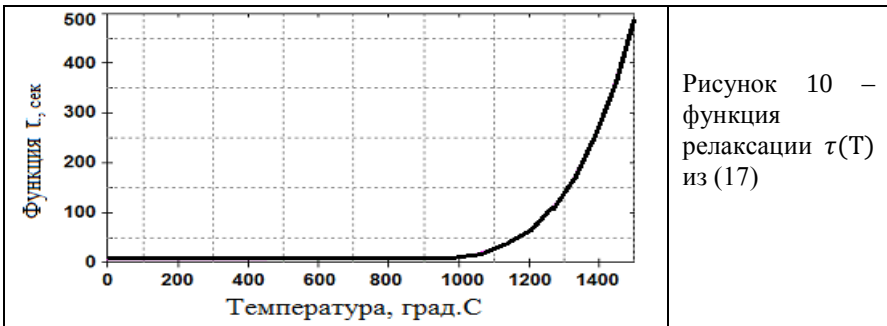


Рисунок 10 – функция релаксации $\tau(T)$ из (17)

ξ следует понимать, как параметр временного упрочнения. Он связан с уравнением:

$$\dot{\xi} + \xi/\tau(T) = \dot{T}, \quad (17)$$

где $\dot{T}$ - скорость изменения температуры; $\tau(T)$ - функция релаксации по времени параметра ξ в зависимости от температуры (рис. 10).

Модуль вязкости при сдвиге зависит от вязкости коэффициента Пуассона ν^v [12]:

$$\frac{1}{G^v} = \frac{2[1+\nu^v(d)]}{3[1-2\nu^v(d)]} \frac{1}{K^v}, \quad (18)$$

где

$$\nu^v(d) = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{d}{3-2d}} \quad (19)$$

Напряжения спекания рассчитываются по зависимости:

$$\sigma_s = f_{s1}(d) \frac{\gamma}{l_0}, \quad (20)$$

где $f_{s1}(d)$ - функция масштабирования напряжений спекания, определяемая в зависимости от относительной плотности d , согласно формуле [11]:

$$f_{s1}(d) = 2^3 \sqrt{\frac{6d}{1-d}}, \quad (21)$$

где γ - плотность энергии натяжения равна 2 Дж/м²; l_0 - начальный размер зерна перед спеканием, равный 10 мкм.

Моделирование процесса спекания осуществляли для титановой пластины толщиной 1 мм, длиной 32 мм и шириной 16 мм с начальной относительной плотностью равной 0,96.

Для отображения влияния тепловых эффектов при моделировании процесса спекания решалась связанная термомеханическая задача. Для термической задачи задавали удельную теплоемкость и теплопроводность, как функции от температуры (рис. 11-12).

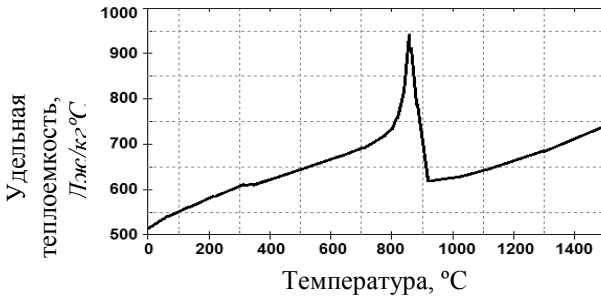


Рисунок 11 –
Изменение
удельной
теплоемкости
титана в
зависимости от
температуры

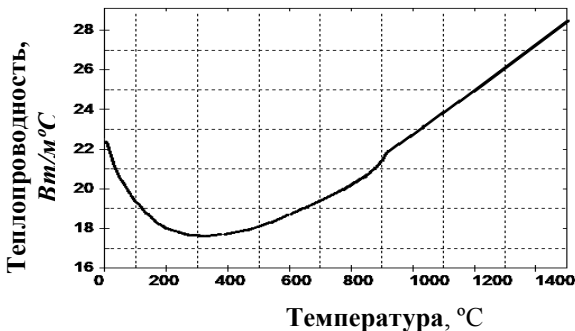


Рисунок 12 –
Изменение
теплопроводность
титана в
зависимости от
температуры

Тепловые граничные условия задавались в виде конвективной нагрузки с коэффициентом теплоотдачи 1000 кВт/м² °C и функцией температуры от времени (рис. 13 -режим спекания).

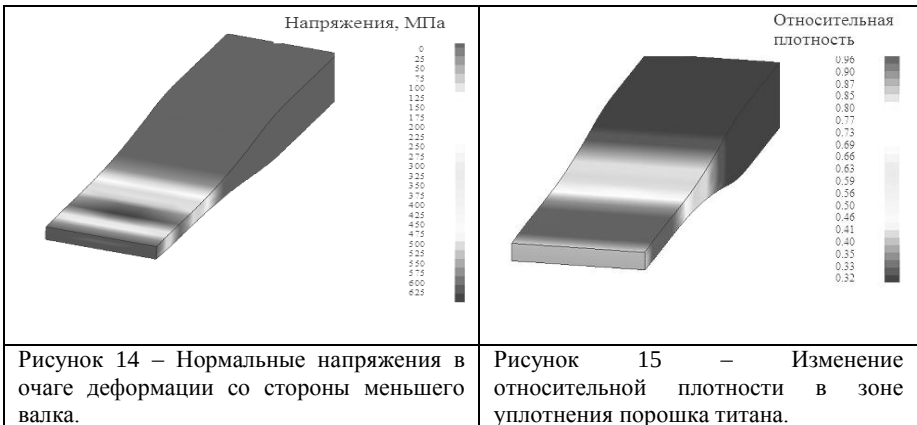


Рисунок 13 –
Режим
спекания
прокатанной
титановой
пластины

Анализ результатов моделирования

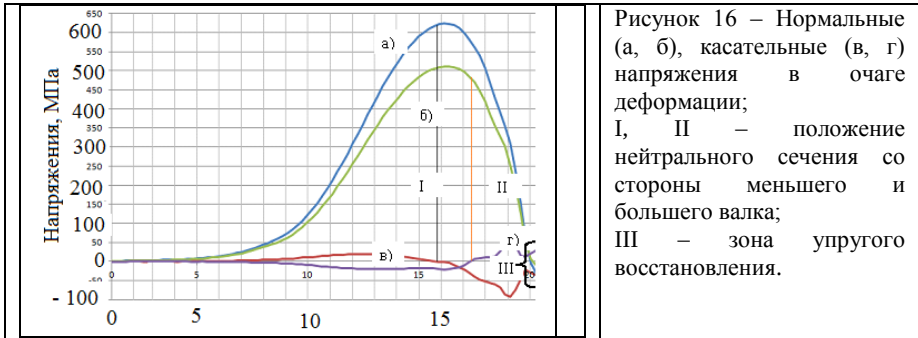
Несимметричная холодная прокатка. В результате решения для модели БН были получены поля напряжения заготовки в очаге деформации со стороны меньшего вала (рис. 14) и поле уплотнения - рис.15. Со стороны вала меньшего диаметра максимальная величина напряжений составляет 625 МПа, в то время как со стороны вала большего диаметра максимальные напряжения составляют 510 МПа.

Из рис. 15 следует, что в зоне уплотнения заготовки передний конец уже выходящей из валков заготовки имеет несколько меньшую относительную плотность (порядка 0,85), поэтому передние концы в процессе производства обрезают. При воздействии сжимающих усилий со стороны валков передний конец не только уплотняется, но и растягивается за счет свободного упругого восстановления. Следующие элементы за передним концом растягиваются и восстанавливаются по толщине в меньшей мере.



Наиболее интенсивное уплотнение заготовки образуется в зоне выхода ее из валков, это объясняется значением параметра L/X , который характеризует положение зоны уплотнения. Положения нейтральных

сечений I и II со сторон валков меньшего и большего диаметра соответствуют центрам зон сцепления (прилипания). А протяженность этих зон соответствует области монотонного изменения знака касательных напряжений (напряжений трения). За пределами этих зон сцепления присутствуют зоны опережения и отставания. Модель БН учитывает упругое восстановление полосы (зона III на рис. 16) на выходе из очага деформации.



Спекание полосы В результате проведенного моделирования процесса спекания пластины из титана были получены поля напряжений и уплотнения. Процесс уплотнения моделировали при температуре спекания 1250 °С.

На рис.17 показаны графики изменения относительной плотности пластины из титана в соответствии с наложенным температурным режимом спекания. Более интенсивное изменение плотности наблюдается на угловом краю пластины (график – 2), относительная плотность достигает значения 0,995, в то время как по центру пластины (график – 3) относительная плотность составляет 0,994.

График изменения относительной плотности на рис.17 условно можно разделить на три зоны: I – зона теплового расширения, в которой с повышением температуры плотность не меняется, но происходит расширение пластины за счет влияния коэффициента теплового расширения; II – зона спекания, в которой при увеличении температуры и ее выдержке происходит увеличение плотности титановой пластины; III- зона охлаждения, в которой плотность не меняется с понижением температуры.

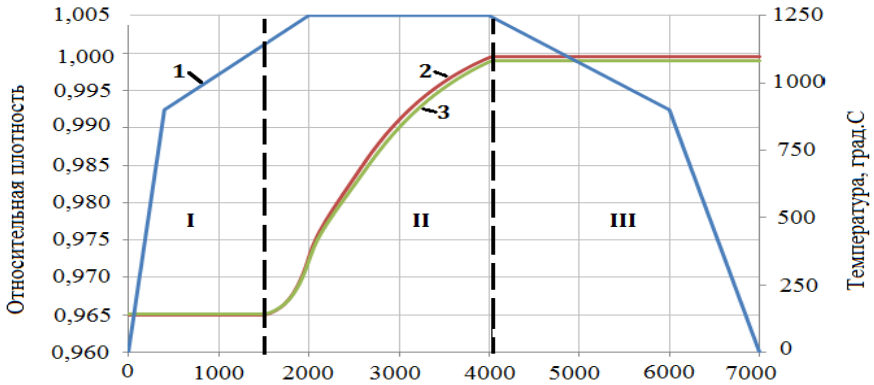


Рисунок 17 – Изменение относительной плотности пластины в процессе спекания на угловом краю – 3 и в центре – 2 в процессе спекания – 1; I – зона теплового расширения при нагреве; II – зона спекания титановой пластины; III – зона сужения при охлаждении

На рис.18 показано распределение относительной плотности в титановой пластине в начале и в конце процесса спекания.

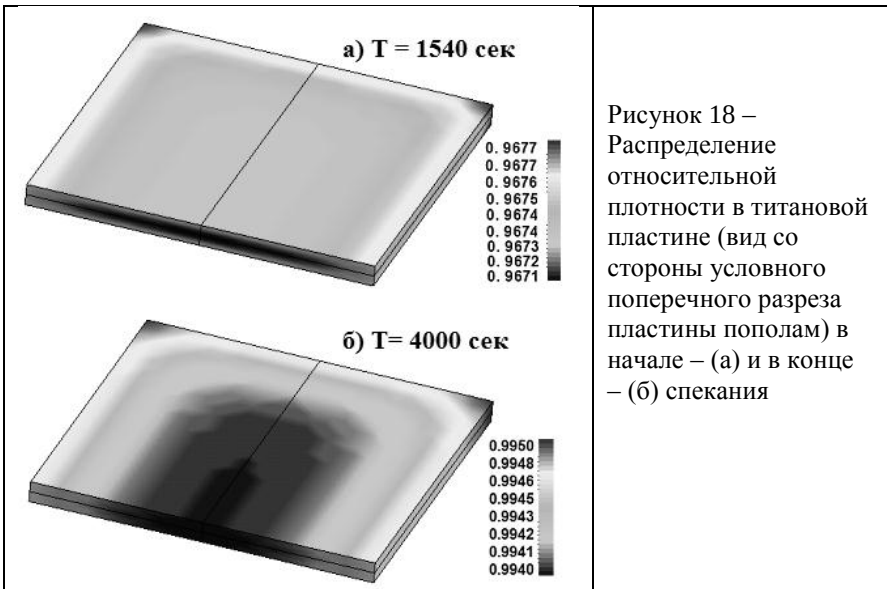


Рисунок 18 – Распределение относительной плотности в титановой пластине (вид со стороны условного поперечного разреза пластины пополам) в начале – (а) и в конце – (б) спекания

На рис.19-б показано изменение напряжений в период спекания. Максимальные напряжения (29 кПа) возникают в начале участка, где начинается температурная выдержка при монотонном возрастании плотности (рис. 17).

На рис.19 представлено изменение эквивалентных напряжений по Мизесу в процессе спекания титановой полосы. Для удобства анализа напряженного состояния временной интервал был разбит на три участка по аналогии с рис.17.

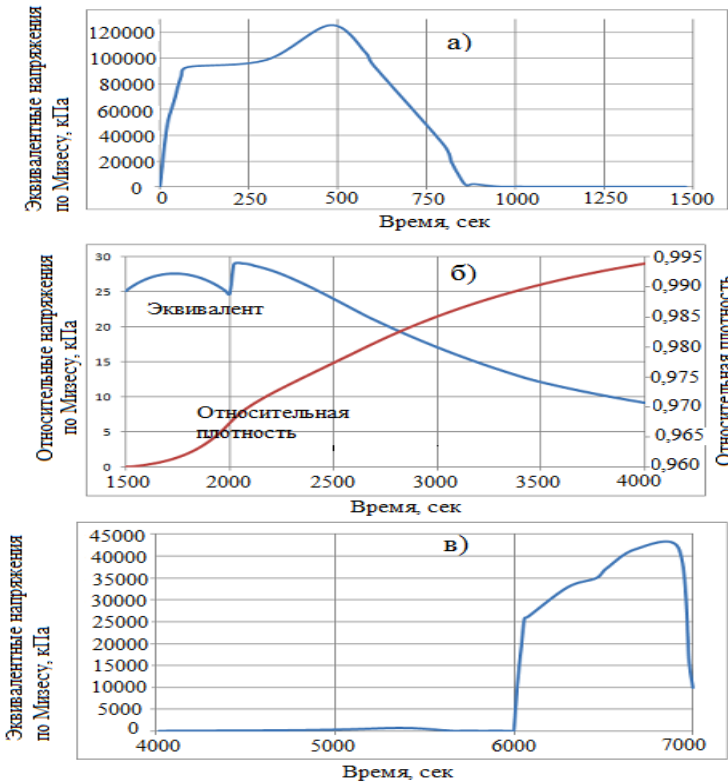


Рисунок 19. – Изменение эквивалентных напряжений по Мизесу и относительной плотности на временных интервалах – а) зона нагрева, при постоянной начальной плотности; – б) зона спекания, изменения плотности; – в) зона охлаждения, плотность постоянна

На рис. 19-а показано изменение эквивалентных напряжений по Мизесу в период нагрева на временном участке, при котором относительная плотность не изменяется. Наибольшее возрастание напряжений (130 МПа)

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2019. - Вып.33
«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33

ISSN 2522-9117 «Fundamental'nye i prikladnye problemy černoј metallurgii». – 2019. – Vypusk 33

происходит на временном участке от 0 сек – 400 сек, где скорость нагрева равна $2,25\text{ }^{\circ}\text{C/сек}$. Данный уровень напряжений является не критичным, так как предел прочности для титана составляет около 550 МПа. В период времени 400сек – 1500 сек уровень напряжений значительно уменьшается до 25 кПа за счет снижения скорости нагрева до $0,22\text{ }^{\circ}\text{C/сек}$. На данном участке напряжения являются исключительно термическими.

На рис.19-в показано напряженное состояние при охлаждении титановой пластины. В период времени с 4000 сек до 6000 сек, где скорость охлаждения составляет $0,175\text{ }^{\circ}\text{C/сек}$, уровень напряжений уменьшается до 5 кПа. А в период от 6000 сек до 7000 сек при скорости охлаждения $0,9\text{ }^{\circ}\text{C/сек}$ напряжения резко возрастают до уровня 43 МПа.

На рис. 20 представлено распределение эквивалентных напряжений по Мизесу в период разогрева, где за счет большой скорости охлаждения $2,25\text{ }^{\circ}\text{C/сек}$, они достигают максимального уровня 130 МПа в центре пластины. Аналогичное распределение напряжений наблюдается и в период охлаждения пластины (6000 сек – 7000 сек).

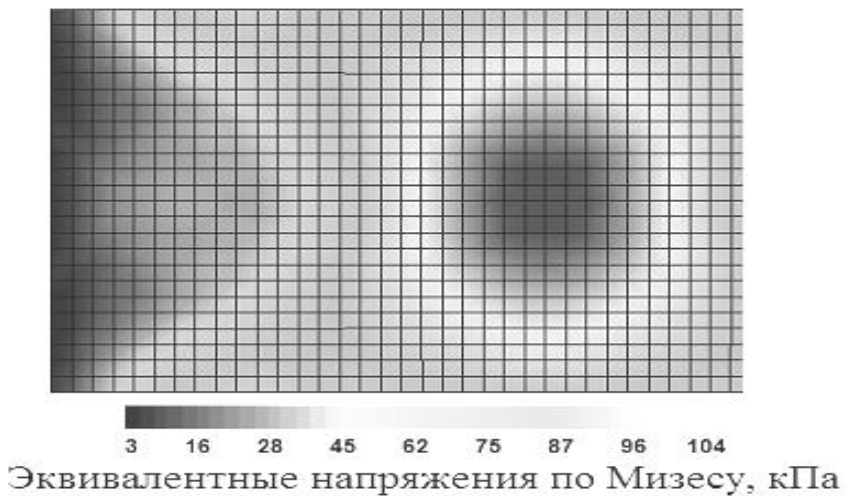


Рисунок 20 – Напряженное состояние титановой пластины в период разогрева ($T = 480\text{ сек}$)

На рис. 21 показано изменение напряжений спекания в период температурной выдержки (рис. 17), где плотность монотонно возрастает. Таким образом, была исследована и реализована модель спекания Брандта-Нильсона на примере титановой пластины. Установлено влияние температурных скоростей на процесс спекания.

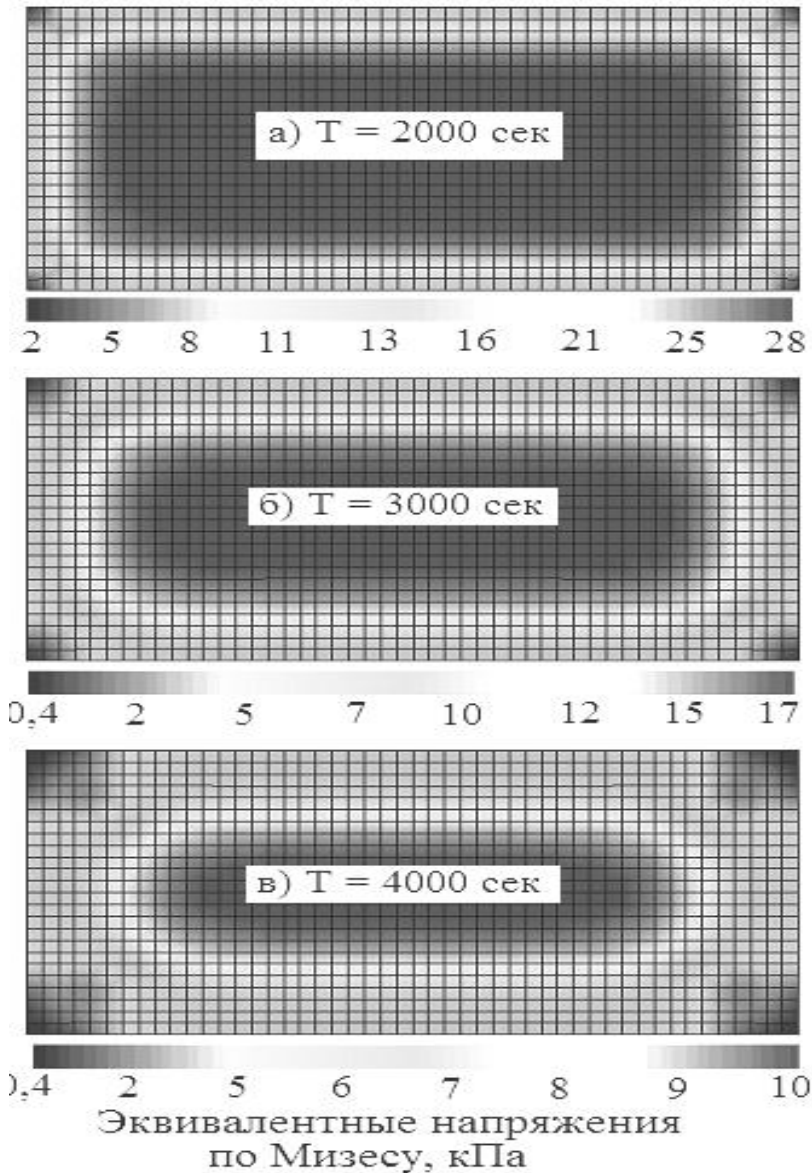


Рисунок 21 – Напряженное состояние титановой пластины в период спекания при нулевой температурной скорости

Выводы. Поскольку основные причины брака при спекании спрессованных деталей являются недостаточно однородная плотность спеченного материала и наличие микротрещин при очень интенсивном нагревании металла в печи, то применение диаграмм изменения плотности (рис. 18) и напряжений по Мизесу (рис. 20) для коррекции режима спекания позволит избежать появления подобных дефектов в производстве. Спекание объемных тел является более трудоемким процессом, чем спекание тонких пластин, поэтому разработка режимов спекания на основе результатов модели БН упрощает совершенствование технологии.

Варьированием параметрами технологии возможно достигать целенаправленных воздействий на показатели качества изделий и предотвращать образование в них микротрещин.

Бібліографічний список / Reference

1. Kang Suk-Joong L., *Sintering. Densification, Grain Growth and Microstructure*. Elsevier Butterworth-Heinemann Linacre House, Jordan Hill, Oxford OX2 8DP 30 Corporate Drive, Burlington, MA 01803, (2005), 265p.
2. Brandt, J., Nilsson L. (1999). A constitutive model for compaction of granular media, with account for deformation induced anisotropy. *Mechanics of Cohesive. Frictional Materials*, 4, 391–418. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1484\(199907\)4:4<391::AID-CFM68>3.0.CO;2-0](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1484(199907)4:4<391::AID-CFM68>3.0.CO;2-0)
3. Brandt, J., (1998). On Constitutive Modeling of the Compaction and Sintering of Cemented Carbides, Department of Mechanical Engineering, Linköping University, Linköping, Sweden.
4. Carlson S.R., Bonner B.P., F.J. Ryerson, M.M. Hart. (2006). *Compaction of Ceramic Microspheres, Spherical Molybdenum Powder and Other Materials to 3 GPa*. Lawrence Livermore National Laboratory. Livermore, California 94551. 129 p. <https://doi.org/10.2172/899097>
5. Siegkas, P., Tagarielli, V.L., Petrinic, N. & Lefebvre, L.P.. (2010). The compressive response of a titanium foam at low and high strain rates. *Springer Science-Business Media, LLC*. <https://doi.org/10.1007/s10853-010-5147-3>
6. Zadeh, H.K.. (2010). *Finite element analysis and experimental study of metal powder compaction*. A thesis submitted to the Department of Mechanical and Materials Engineering in conformity with the requirements for the degree of Doctor of Philosophy Queen's University Kingston, Ontario, Canada. September, 2010. 165pp.
7. Andersson D.C., Larsson P., Cadario A., Lindskog P. (2010). *On the influence from punch geometry on the stress distribution at powder compaction*. Department of Solid Mechanics, Royal Institute of Technology SE-10044 and Sandvik Tooling Sverige AB, SE-12680, Stockholm, Sweden, Powder Technology 202, 78–88. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2010.04.016>

8. Avallone E.A., Baumeister III T., Sadegh Ali.M.. (2007). *Marks' Standard Handbook for Mechanical Engineers*. Eleventh Edition, USA. Library of Congress Catalog Card Number: 87-641192. 2305pp.
9. Cohen, M.H. & Turnbull, D. (1959). *Journal chemical and physics*. 31. 1164. <https://doi.org/10.1063/1.1730566>
10. Zhigang Zak Fang. (2010). *Sintering of advanced materials, fundamentals and processes*. Woodhead Publishing Limited, Abington Hall, Granta Park, Great Abington, Cambridge CB21 6AH, UK, 2010, 483p.
11. Haglund S.A., Agren J., Lindskog P., Uhrenius B. (1996). *Solid state sintering of cemented carbides in Sintering 1995-1996*, R. G. Cornwall, R. M. German and G. L. Messing eds, Marcel Dekker, New York, 1996, pp. 141—148.
12. Young-Sam Kwon, Suk-Hwan Chung, Chantal Binet, Rui Zhang, Renata S. Engel, Nicholas J. Salamon et al. *Application of Optimization Technique in the Powder Compaction and Sintering Processes*. 9.131-9.146 pp.

І.Ю. Приходько, д.т.н., с.н.с., зав. відділом, ORCID 0000-0001-5651-8106

М.О. Дедік, ORCID 0000-0001-8585-896X

Інститут чорної металургії НАН України ім. З.І. Некрасова

Стефан Брандт, Швеція, консультант

К.О.Гогаєв, член-кор. НАНУ, д.т.н., зав. відділом, <https://orcid.org/0000-0002-0304-2535>

О.І. Іценко, к.т.н., с.н.с.

В.С.Воропась, к.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0001-7408-5957

Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича

Комплексне скінчено-елементне дослідження процесів виробництва титанових штаб несиметричною холодною прокаткою порошку з наступним спіканням

Анотація. Реалізовано скінчено-елементне чисельне моделювання та виконано дослідження процесів виробництва тонких титанових штаб на основі розгляду двох ключових послідовних процесів: несиметричної прокатки порошку і спікання прокатоного виробу із застосуванням моделі Бранда-Нільсона. Для розрахунків використані експериментально певні напруги чистого зсуву і об'ємного модуля стиснення при гідростатичному стисканні і одноосьовому стисканні. Умови тертя між поверхнями валків і порошком визначалися як функція зміни кулонівського коефіцієнта тертя від відносної швидкості ковзання поверхонь валка і заготовки. Наведено результати дослідження процесів ущільнення і спікання порошку титану за допомогою єдиної математичної моделі, запропонованої Яном Брандтом.

Аналіз результатів дозволяє кількісно оцінити вплив параметрів технології процесів ущільнення і спікання на зміну напруженого стану і відносної щільності в обсязі виробів на стадіях процесів виробництва. Показано, що застосування діаграм зміни щільності та напружень по Мизесу для корекції режиму спікання дозволить уникнути появи дефектів (недостатньо однорідна щільність спеченого матеріалу і наявності мікротріщин) при інтенсивному нагріванні металу в печі. Розроблення режимів спікання на основі моделі Бранда-Нільсона спрощує вдосконалення

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2019. – Вып.33

«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33

ISSN 2522-9117 *«Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii». – 2019. – Vypusk 33*

технології при спіканні об'ємних тіл, що є більш трудомістким процесом, ніж спікання тонких пластин.

Дана модель може застосовуватися при розробці режимів спікання різних матеріалів, тому що враховує вплив основних явищ в цьому процесі. Варіюванням параметрів технології можливо досягати цілеспрямованих впливів на показники якості виробів і запобігати утворенню в них мікротріщин.

Ключові слова: несиметрична прокатка порошку, спікання, титан.

I.Yu. Prykhodko, Dr. Sci., Senior Researcher, Head of Department, ORCID 0000-0001-5651-8106

M.O. Dedik, ORCID 0000-0001-8585-896X

Iron and Steel Institute named after Z.I. Nekrasov of the NAS of Ukraine

Stefan Brandt, Sweden, consultant

K.O. Gogaev; NAS Corresponding Member, Dr. Sci., Head of Department, ORCID 0000-0002-0304-2535

A.I. Itsenko, PhD, Senior Researcher

V.S. Voropaev, PhD, Senior Researcher, ORCID 0000-0001-7408-5957

Institute of Materials Science named after I.N. Frantsevich

Comprehensive finite-element study of processes for the production of titanium strips by asymmetric cold rolling of a powder followed by sintering

Summary. Finite-element numerical modeling was implemented and a study of the production processes of thin titanium strips was carried out on the basis of two key sequential processes: asymmetric powder rolling and sintering of the rolled product using the Brand-Nielson model. The results of studying the processes of compaction and sintering of titanium powder using a single mathematical model proposed by Jan Brandt are presented. For the calculations we used experimentally determined shear stresses and volumetric compression modulus under hydrostatic compression and uniaxial compression. The friction conditions between the surfaces of the rolls and the powder were determined as a function of the change in the Coulomb coefficient of friction on the relative sliding speed of the surfaces of the roll and the workpiece. An analysis of the results allows a quantitative assessment of the influence of the technology parameters of the compaction and sintering processes on the change in the stress state and relative density in the volume of products at the stages of production processes. It is shown that the application of the von Mises density and stress diagrams for the correction of the sintering regime allows avoiding the appearance of defects (insufficiently uniform density of the sintered material and the presence of microcracks) during intense heating of the metal in the furnace. The development of sintering modes based on the Brand-Nielson model simplifies the improvement of technology in the sintering of bulk bodies, which is a more time-consuming process than sintering of thin plates. This model can be used in the development of sintering regimes for various materials since it takes into account the influence of basic phenomena in this process. By varying the technology parameters it is possible to achieve targeted effects on product quality indicators and prevent the formation of microcracks in them.

Keywords: asymmetric powder rolling, sintering, titanium.

For citation: *Prikhod'ko I.YU., Dedik M.A., Stefan Brandt, Gogayev K.A., Itsenko A.I., Voropayev V.S. Kompleksnoye konechno-elementnoye issledovaniye protsessov proizvodstva titanovykh polos metodami nesimmetrichnoy kholodnoy prokatki poroshka s posleduyushchim spekaniyem. [Comprehensive finite element study of titanium strip production processes using asymmetric cold rolling of powder with subsequent sintering.]. «Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii».[Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy] 2020, 34. 173-192. (In Russian).*
DOI 10.52150/2522-9117-2019-33-173-192

*Статья поступила в редакцию сборника 25.09.2019 года,
прошла внутреннее и внешнее рецензирование (Протокол заседания
редакционной коллегии сборника №1 от 23 декабря 2019 года)*

Д.Н. Тогобицкая, д.т.н., проф., зав.отделом, ORSID 0000-0001-6413-4823

А.И. Белькова, к.т.н., с.н.с., ORSID 0000-0001-8519-9351

Д.А. Степаненко, к.т.н., с.н.с., ORSID 0000-0002-0184-8295

Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины

РАЗВИТИЕ БАЗЫ ЗНАНИЙ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ СИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ

Аннотация. В Институте черной металлургии создана База знаний «Металлургия» (БДМет), которую можно использовать для моделирования физико-химических свойств металлургических систем и процессов на базе современных информационных компьютерных технологий. Целью работы является развитие фундаментальных основ и выявление основных направлений развития БДМет, расширение представления информации фундаментальной, технологической и нормативно-справочной направленности для анализа и многокритериальной оптимизации технологических процессов. Составной частью БДМет является также База моделей металлургических систем и технологических процессов, прикладное и программное обеспечения теоретических исследований. База данных содержит экспериментальные данные физико-химических свойств металлических и шлаковых расплавов, образующихся из соответствующих шихтовых материалов в восстановительных и окислительных условиях. Показаны результаты актуальных научных и прикладных разработок отдела физико-химических проблем металлургических процессов. Отмечено, что наличие в БДМет фонда моделей по переделам и единая методология их создания по модульному принципу позволяет обеспечить генерацию моделей в единую сквозную модель, выявить оптимальную схему металлургических процессов и обеспечить производство металла заданного качества в рамках сквозной технологии. Показано, что использование позволяет решать задачи оптимизации технологических процессов производства чугуна и стали. Определены перспективы развития дальнейших исследований для системного накопления в базах документально-фактографических данных и экспериментальной информации о свойствах металлических и шлаковых расплавов, а также их дальнейшего использования в восстановительных и окислительных процессах металлургического производства.

Ключевые слова: база данных, база моделей, методология, физико-химическое и математическое моделирование, физико-химические свойства систем, металлургические процессы.

Ссылка для цитирования: *Тогобицкая Д.Н., Белькова А.И., Степаненко Д.А. Развитие базы знаний для моделирования физико-химических свойств металлургических систем и процессов. // «Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2019. – Вып.33. – С.193-204. (In Russian). DOI 10.52150/2522-9117-2019-33-193-204*

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2019. - Вып.33

«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33

ISSN 2522-9117 «Fundamental'nye i prikladnye problemy čornoj metallurgii». – 2019. – Vypusk 33

Состояние проблемы.

Современные технологии должны базироваться на глубоких знаниях физико-химических процессов, сопровождающих все сквозные стадии производства металлопродукции. В решении этого вопроса особая роль принадлежит инвестициям ученых академической науки, в совершенстве владеющих методологией научных исследований в области свойств материалов, формирование которых осуществляется по схеме «Шихта+Технология=Готовая продукция».

Современный этап научного познания характеризуется стремлением к глобальному синтезу знаний, что в значительной степени определяется уровнем интеграции знаний Ученых-экспериментаторов и усиливающейся математизацией их анализа, методов обработки и глубокого осмысливания. Именно с таких отправных позиций были развернуты работы по созданию в конце прошлого столетия Банка данных «Металлургия» (БДМет) [1, 2]. Основоположниками принципов создания БДМет явились три крупных научных центра СССР, а инициатором выступил Институт черной металлургии, три ведущих специалиста которого (д.т.н. Товаровский И.Г., д.т.н. Приходько Э.В. и д.т.н. Тогобицкая Д.Н) вошли в Госкомитет по науке и технике по вопросам ведения БДМет. При выработке стратегических решений развития отраслевой металлургии организаторы и участники Проекта ставили глобальную задачу сохранения и преумножения накопленного «золотого» фонда результатов экспериментальных исследований о поведении и свойствах металлургических расплавов и систем, а также доведение результатов фундаментальных исследований до уровня авторизованных программных продуктов с их реализацией для решения практических задач металлургии.

Именно этой важнейшей проблеме в Институте черной металлургии уже несколько десятков лет уделяется самое пристальное внимание. Главным куратором в этом направлении является созданный в конце прошлого века отдел физико-химических проблем металлургических процессов. К настоящему времени отдел не только сохранил принципы создания и развития БДМет, но и обеспечил переход к созданию интегрированной Базы Знаний для сквозного анализа производства металлопродукции на базе современных информационных компьютерных технологий. Отдел физико-химических проблем металлургических процессов самостоятельно и совместно с технологическими отделами института осуществляет фундаментальные, поисковые и прикладные исследования, связанные с созданием информационных технологий в области металлургии чугуна и стали на основе комплексного использования методов физико-химического и математического

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2019. - Вип.33

«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33

ISSN 2522-9117 *«Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii». – 2019. – Vypusk 33*

моделирования, позволяющих проводить научно-обоснованный поиск новых технологических решений путем вычислительного эксперимента.

Интеграция усилий и накопленные когнитивные знания физико-химиков и математиков обеспечили весомый прогресс методов познания физико-химической природы металлургических систем, их математического моделирования по схеме состав-структура-свойства на уровне межатомного взаимодействия на основе оригинальной концепции направленного химической связи, разработанной д. т.н. Приходько Э.В. и аналитически реализованной в творческом сотрудничестве с д.т.н. Тогобицкой Д.Н.

На протяжении последних 27 лет методика физико-химического моделирования многокомпонентных систем обеспечивает возможность прогнозировать свойства металлических и шлаковых расплавов и систем всех переделов производства металлопродукции на основе расчета параметров межатомного взаимодействия [3], обеспечивает основу для построения и программной реализации надежных моделей процессов производства чугуна, стали и проката, процессов десульфурации, дефосфорации и шлакообразования. Эти разработки реализованы в системах АСНД, АСУП и АСУТП, которые внедрены на многих металлургических предприятиях Украины и стран СНГ.

Целью настоящей работы является изложение результатов научных исследований и практических разработок отдела физико-химических проблем металлургических процессов, полученных в последнее десятилетие в рамках развиваемой в Институте черной металлургии Базы Знаний «Металлургия» и направленных на совершенствование методологических основ для прогнозирования и оптимизации металлургических процессов и систем в современных условиях.

Основной материал исследования. Создание интегрированной Базы Знаний для сквозного анализа производства металлопродукции требуемого качества при минимальных энергетических и сырьевых затратах на базе современных информационных компьютерных технологий, включает:

- актуализацию и ведение Баз данных фундаментальной, технологической и нормативно-справочной направленности, в частности, экспериментальные данные физико-химических свойств металлических и шлаковых расплавов, образующихся из соответствующих шихтовых материалов в восстановительных и окислительных условиях [4];
- развитие и пополнение Базы моделей, содержащей физико-химические и математические модели металлургических систем и технологических процессов;
- разработку прикладного и системного программного обеспечения теоретических исследований, в частности, средств работы с базами

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2019. - Вип.33

«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33

ISSN 2522-9117 *«Fundamental'nye i prikladnye problemy čornoj metallurgii». – 2019. – Vypusk 33*

данных, сервис работы с многомерными данными и инструментальные средства "свертки" физико-химической и технологической информации, методы оценки достоверности экспериментальных данных и работоспособности моделей различного уровня, а также многокритериальной оптимизации технологических процессов.

Наличие баз данных и моделей по каждому переделу производства металлопродукции позволит оперативно генерировать инструментальные средства (подсистемы) для комплексного анализа, прогнозирования и оптимизации физико-химических процессов; технико-экономических показателей технологий получения металла (производительности, расхода энергетических и сырьевых затрат), а также анализа показателей металлургических агрегатов, аудита предприятий и отрасли в целом за счет привлечения современных достижений академической и отраслевой науки, соответствующих технических средств и организации работы технолога с информационно-аналитической системой в режиме тандема взаимной дополнительности.

За последние годы в отделе главное внимание было уделено созданию методологических основ анализа и оптимизации процессов производства чугуна и стали на основе комплексного использования методов математического и физико-химического моделирования. Наиболее значимые научно-практические результаты разработок в этом направлении были получены для практически всех металлургических переделов.

Для решения задач оптимизации состава доменной шихты и качества чугуна на основе установленных закономерностей влияния качества железорудного сырья на процессы их агрегатных преобразований в доменной печи разработана концепция моделирования процессов направленного формирования расплавов, реализованная в виде комплекса физико-химических и математических прогнозных моделей, критериев и методов для оптимизации технико-экономических показателей доменной плавки [5-8]. Методика обеспечивает прогнозный расчет химического состава чугуна и шлака и позволяет решать обратную задачу: определять показатели загружаемой подачи по заданным показателям продуктов плавки. Полученные результаты подтверждены 4 новыми патентами на изобретение (2012-2016гг.), реализованы в компьютерной системе и опробованы для выбора рационального состава доменной шихты в сырьевых условиях ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог», МК «Запорожсталь», «Северсталь».

С целью развития научных основ о структуре шлаковых расплавов и использования полученных новых знаний при выборе рационального состава шлаков для процесса электрошлакового переплава выполнены аналитические и экспериментальные исследования теплофизических

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2019. - Вип.33

«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33

ISSN 2522-9117 *«Fundamental'nye i prikladnye problemy čornoj metallurgii». – 2019. – Vypusk 33*

свойств шлаков, температур чугуна и шлака, вязкости и электропроводности доменных шлаков, шлаков ЭШП и ШОС, усовершенствованы прогнозные модели для их оперативной оценки на основе накопленных данных. В результате актуализирована база данных «Шлак» и совместно с сотрудниками отдела металлургии стали сформирована база данных «ШОС», содержащая информацию о вязкости и электропроводность шлакообразующих смесей, как структурно чувствительных свойств.

Для учета гетерогенности шлаковых расплавов с целью обоснованного выбора рационального шлакового режима доменной и сталеплавильной плавки на основе взаимосвязи вязкости и удельной электропроводности шлаков разработан критерий - температура гетерогенизации, характеризующий температуру расплава, при которой в равновесном состоянии находятся гетеро- и гомеополарные связи структурных частиц шлака [9]. С позиции оценки гетерогенности расплавов доменных шлаков научно обоснован рациональный шлаковый режим доменной плавки для условий работы ДП№4 ОАО «Запорожсталь» и ДП№8 ПАО «АМКР».

Результаты исследований использованы для установления оптимального состава шлака процессов ЭШП при участии Института электросварки им. Е.А. Патона НАНУ. Под руководством академика НАНУ М.И. Гасика совместно с сотрудниками ПАО «Днепропетрсталь» научно обоснована замена импортного плавикового шпата щелочным алюмосиликат - пегматит Елисеевского месторождения при внепечной обработке стали на установке «ковш-печь».

Для решения задач оптимизации процессов выплавки и доводки стали совместно с сотрудниками отдела металлургии стали разработана методика прогнозирования физико-химических свойств конвертерных, электропечных и рафинировочных шлаков, которая используется для выбора рационального шлакового режима (ПАО «Меткомбинат им. Дзержинского», ПАО «Днепропетрсталь»).

На основе физико-химического моделирования расплавов на уровне межатомного взаимодействия впервые разработан метод оценки и учета микронеоднородности металлических систем с использованием интегральных физико-химических параметров - структурного (Δd) и зарядового состояния (ΔZ_y) и направленной зарядовой плотности (ρ_l), что позволило линеаризовать сложные концентрационные зависимости термодинамических свойств и повысить точность описательных моделей. В частности, с использованием сформированной базы данных «Ферросплавы», включающей информацию отечественных и зарубежных авторов о свойствах ферросплавов широкого сортамента, разработан и программно реализован комплекс моделей для расчета физических и

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2019. – Вип.33

«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33

ISSN 2522-9117 *«Fundamental'nye i prikladnye problemy čornoj metallurgii». – 2019. – Vypusk 33*

теплофизических свойств стандартных марок ферросплавов отечественного производства (ФМн78, ФС65 и МнС17), которые целесообразно использовать в системах АСНД и АСУТП доводки стали. Разработана методика генерации комплексных ферросплавов нового поколения, обеспечивающих решение задач легирования и микролегирования стали [10]. По результатам исследований получено авторское право на научное произведение «Методика корректировки содержания элементного состава стали» (№70524, дата регистрации 20.02.2017) [11].

Для решения задач улучшения физико-механических свойств готовой металлопродукции в отделе разработана методика комплексной оптимизации химического состава и технологических параметров производства сталей и сплавов целевого назначения [12], которая прошла апробацию в условиях ряда предприятий отрасли.

В частности, на основе физико-химической модели структуры металлических расплавов научно обоснованные рациональные пределы изменения компонентного состава жаропрочной коррозионностойкой стали 14X17H2 в условиях ОАО «Днепроспецсталь». Обоснована целесообразность разделения общего легирующего комплекса стали на подсистемы: матричную, легирующую и примесную. Выявлена роль примесной микролегирующей подсистемы в формировании механических свойств стали и получены закономерности для оценки степени ее влияния на основе интегральных параметров ее химического состава.

Обоснована и промышленно подтверждена целесообразность микролегирования стали 14X17H2 бором [13], которая обеспечивает необходимое качество и снижение дефектов в металлопродукции на 24 кг/т и 6 кг/т для выборочной и сплошной зачистки соответственно. Алгоритмические и программные средства прошли промышленную апробацию в условиях комбината и переданы технологическим службам для их внедрения в системы контроля и управления качеством металлопродукции ОАО «Днепроспецсталь».

Для решения задач выбора оптимального состава стали совместно с отделом конструкционных сталей создана интегрированная база данных о составе и свойствах колесных сталей, включая нормативно-справочную информацию, данные лабораторных исследований, а также производственные поточные данные плавов. Выявлены закономерности влияния химического состава на физико-механические свойства сталей для железнодорожных колес на уровне межатомного взаимодействия [14]. На основе вычислительного эксперимента и оптимизационных процедур определены рациональные диапазоны изменения элементов матричной системы, обеспечивающие необходимые технологические свойства стали, соответствующие ГОСТ 10791-2004. В результате исследований влияния

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2019. - Вип.33

«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33

ISSN 2522-9117 «Fundamental'nye i prikladnye problemy čornoj metallurgii». – 2019. – Vypusk 33

температурно-временных параметров на твердость хромомолибденовой стали с использованием управляющих картограмм показано, что на снижение показателей твердости большее влияние оказывает температура нагрева, чем продолжительность изотермической выдержки.

Кроме перечисленных наиболее важных научно-практических результатов, в отделе постоянно ведутся работы по совершенствованию информационно-математического обеспечения исследований, в частности, развивается информационно-поисковая система для ведения баз данных, разработана методика генерации интегральных критериев многопараметрической оптимизации металлургических процессов, развито прикладное обеспечение для оценки достоверности и комплексного анализа оперативных фактических данных, формирования массивов репрезентативных данных с целью снижения зашумленности входной информации для создания адекватных прогнозных моделей, способствующих обоснованному выбору рациональных технологических режимов.

Заключение. Потенциал развития исследований отдела физико-химических проблем металлургических процессов связан с развитием фундаментальных основ интегрированной Базы Знаний «Металлургия» для сквозного анализа и оптимизации производства металлопродукции.

В настоящее время в отделе в рамках выполнения академических работ и трех целевых работ конкурсной тематики «Новые материалы» (рук. НИР д.т.н. Бабаченко А.И., д.т.н. Вергун А.С., д.т.н. Муравьева И.Г.) совместно со специалистами технологических отделов ведутся системные работы по накоплению в базах документально-фактографических данных экспериментальной информации о свойствах металлических и шлаковых расплавов и процессах их получения в восстановительных и окислительных условиях. Также в отделе постоянно развивается база моделей, содержащая физико-химические и математические модели металлургических систем и технологических процессов на основе теоретических основ описания физико-химических и теплофизических свойств на уровне межатомного взаимодействия. База знаний является информационной и теоретической основой для создания интеллектуальных систем прогнозирования, оптимизации и управления процессами производства чугуна и стали в составе АСНИ, АСУП и АСУТП.

Библиографический список

1. Тогобицкая Д.Н., Жмойдин Г.И. Проблема информационного обеспечения теоретической и прикладной металлургии // Известия АН СССР. Металлургия. Металлы. – 1991. – №4. – С.217–220.

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2019. - Вип.33
 «Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33
 ISSN 2522-9117 «Fundamental'nye i prikladnye problemy čornoj metallurgii». – 2019. – Vypusk 33

2. *Приходько Э.В., Тогобицкая Д.Н.* Роль информационных технологий в повышении качества металлопродукции // Наукові праці «Сучасні проблеми металургії». Матеріали НПК «Проблеми і перспективи одержання конкурентноздатної продукції в гірничо-металургійному комплексі України». Дніпропетровськ. – 2001. – Т.3. – С.450–462.
3. *Прогнозирование физико-химических свойств оксидных систем / Э.В. Приходько, Д.Н. Тогобицкая, А.Ф. Хамхотько, Д.А. Степаненко.* // Днепропетровск: Пороги. – 2013. – 339 с.
4. *Бази даних про властивості матеріалів – інформаційна основа моделювання металургійних систем і процесів / Д.М. Тогобицька, А.І. Белькова, Д.О. Степаненко, Ю.М. Ліхачов, І.Р. Снігура* // Матеріали МНТК «Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні». Дніпро: НМетАУ. – 2019. – С.37.
5. *Тогобицкая Д.Н.* Выбор состава доменной шихты, обеспечивающего направленное формирование жидких продуктов доменной плавки / Д.Н. Тогобицкая, А.И. Белькова, Д.А. Степаненко [и др.] // Металлургическая и горнорудная промышленность. Днепропетровск. – 2016. – № 3. – С.11–18.
6. *Togobitskaya D.N.* Experience of Using the Integral Indicator of the Domain Charge in Selecting the Basic Mode of the Domain Melt / D.N. Togobitskaya, A.I. Bel'kova, I.G. Murav'eva, D.A. Stepanenko // Steel in Translation. – 2018. – Vol. 48. – №. 10. – Рр. 652–658. <https://doi.org/10.3103/S096709121810011X>
7. *Пат. 110435 С2* Україна, МПК (2015.1) C21B 5/00. Спосіб ведення доменної плавки: Пат. 110435 С2 Україна, МПК (2015.1) C21B 5/00 / Д.М. Тогобицька, А.І. Белькова, Д.О. Степаненко, М.А. Гладков, О.С. Скачко (Україна) – № а201409407; Заявлено 26.08.2014; Опубл. 25.12.2015, Бюл. №24. – 5 с.
8. *Пат. 110572 С2* Україна, МПК (2015.1) C21B 5/00. Спосіб доменної плавки луговмісної шихти: Пат. 110572 С2 Україна, МПК (2015.1) C21B 5/00 / Д.М. Тогобицька, Н.А. Цівата, А.І. Белькова, Д.О. Степаненко, (Україна) – № а201411529; Заявлено 23.10.2014; Опубл. 12.01.2016, Бюл. №1. – 4 с.
9. *Пат. 107387 С2* Україна, МПК (2014.1) C21D 5/00. Спосіб дослідження фазових перетворень розплавів електроліту / Д.О. Степаненко, Д.М. Тогобицька, А.Ф. Хамхотько (Україна) – № а201301986; Заявлено 18.02.2013; Опубл. 25.12.2014, Бюл. № 24. – 3 с.
10. *Тогобицкая Д.Н.* Прогнозирование свойств ферросплавов для экспертной оценки эффективности их использования при доводке стали на УПК / Д.Н. Тогобицкая, В.П. Пиптюк, А.Ф. Петров, С.В. Греков. // Металлург. Россия. 2018. №11. С. 27-32.
11. *Тогобицкая Д.Н., Снігура І.Р., Козачек А.С.* Методика вибору хімічного складу сталі в рамках діапазонів, регламентованих ГОСТом, який забезпечує стабілізацію механічних властивостей // Авторське право на науковий твір (методика корегування вмісту елементного складу сталі) №70524; Дата реєстрації 20.02.2017.
12. *Тогобицкая Д.Н.* Системный подход к выбору оптимального элементного состава стали, обеспечивающего требуемый уровень механических свойств / Д.Н. Тогобицкая, В.П. Пиптюк, И.Н. Логозинский [и др.] / Системные

технологии. Региональный сборник научных трудов. Днепропетровск. – 2015. – Вып. 2 (97). – С.91–97.

13. Тогобицкая Д.Н. Микролегирование стали 14X17H2 бором в условиях ПАО «Днепроспецсталь» / Д.Н. Тогобицкая, В.П. Пиптюк, О.В. Кукса [и др.] // Металлургическая и горнорудная промышленность. Днепропетровск. – 2016 – №1. – С.40–45.
14. Бабаченко А.И., Тогобицкая Д.Н., Козачек А.С. Физико-химические критерии и модели для оценки влияния химического состава на свойства колесной стали // Наукові вісті. Сучасні проблеми металургії. Дніпропетровськ. – 2014. – №16. – С. 89.

References

1. Togobitskaya D.N. & Zhmoydin G.I. (1991). Problema informatsionnogo obespecheniya teoreticheskoy i prikladnoy metallurgii [The problem of information support for theoretical and applied metallurgy]. *Izvestiya AN SSSR. Metallurgiya. Metally* [Bulletin of the Academy of Sciences of the USSR. Metallurgy. Metals.]. 1991, 4, 217–220. (In Russian).
2. Prikhod'ko E.V. & Togobitskaya, D.N. (2001). Rol' informatsionnykh tekhnologiy v povyshenii kachestva metalloproduktii [The role of information technologies in improving the quality of metal products]. *Naukovі pratsі «Suchasni problemi metalurgii». Matematicheskiiy NPK «Problemnyye i perspektivnyye konkurentno-proizvodstvennyye komplekсы v Ukraine»* [Scientific works "Modern problems of metallurgy". Materials of NPK "Problems and prospects of obtaining competitive products in the mining and metallurgical complex of Ukraine"]. Dnipropetrovsk, 2001, Vol.3, 450-462. (In Russian).
3. Prikhod'ko E.V., Togobitskaya D.N., Khamkhot'ko A.F. & Stepanenko D.A. (2013). *Prognozirovaniye fiziko-khimicheskikh svoystv oksidnykh sistem. [Prediction of the physical and chemical properties of oxide systems]*. Dnepropetrovsk: Porogi, 2013, 339 p. (In Russian).
4. Togobitskaya D.N., Bel'kova A.Í., Stepanenko D.O., Likhachov Yu.M. & Snigura I.R. (2019). Osnovy upravleniya vlast'yu - informatsionnaya baza model'nykh tekhnologiy metallurgii i protsessov [Base data about the power of materials - information basis for the model of metallurgical systems and processes]. *Materiali MNTK «Informatsionnyye tekhnologii v metallurgii i mashinostroyenii»* [Materials of the ISTC Information Technologies in Metallurgy and Machinery]. Dnipro: NmetAU, 2019, pp. 37. (In Russian).
5. Togobitskaya D.N., Bel'kova, A.I. & Stepanenko D.A. et al. (2016). Vybór sostava domennoy shikhty, obespechivayushchego napravlennoye formirovaniye zhidkikh produktov domennoy plavki [Selection of the composition of the blast-furnace charge, providing the directed formation of liquid products of blast-furnace smelting]. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'* [Metallurgical and mining industry]. 2016, 3, 11-18. (In Russian).
6. Togobitskaya D. N., Bel'kova A.I., Murav'eva I.G. & Stepanenko D.A. (2018). Experience of Using the Integral Indicator of the Domain Charge in Selecting the Basic Mode of the Domain Melt. *Steel in Translation*, 2018, Vol. 48, 10, 652-658. (In Russian). <https://doi.org/10.3103/S096709121810011X>

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2019. - Вып.33

«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33

ISSN 2522-9117 «Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii». – 2019. – Vypusk 33

7. Togobitskaya D.M., Bêl'kova A.I., Stepanenko D.O., Gladkov M.A. & Skachko O.S. *Sposib vedennya domennoi plavki [Method of blast furnace smelting]*: UA Patent 110435 (2015), 5p. (in Ukrainian).
8. Togobitskaya D.M., Tsivata N.A., Bêl'kova A.I. & Stepanenko D.O. *Sposib domennoi plavki lugovmisnoi shikhti [Method of blast furnace smelting of alkali charge]*, UA Patent 110572 (2015), 4c. (in Ukrainian).
9. Stepanenko D.O., Togobitskaya D.N. & Khamkhot'ko A.F. *Sposib doslidzhennya fazovykh peretvoren' rozplaviv yelektrolitu [A method for studying the phase transformations of electrolyte melts]*, UA Patent 107387 (2014), 3 p. (in Ukrainian).
10. Togobitskaya D.N., Piptyuk V.P., Petrov A.F. & Grekov S.V. (2018). Prognozirovaniye svoystv ferrosplavov dlya ekspertnoy otsenki effektivnosti ikh ispol'zovaniya pri dovodke stali na UPK [Prediction of the properties of ferroalloys for an expert assessment of the effectiveness of their use in finishing steel at the UPK]. *Metallurg [Metallurgist]*. 2018, 11, 27-32. (In Russian).
11. Togobitskaya D.N., Snigura I.R. & Kozachek A.S. (2017). *Metodika vibrokhimicheskogo sklada stala v predelakh diapazona, reglamentirovannogo GOSTom, yakoby zablagovremennoy stabilizatsii mekhanichnikh vlastivostey [Methods of choosing the chemical composition of steel within the ranges regulated by GOST, which provides stabilization of mechanical properties]*. Avtorskoye pravo na nauchnyy trud (metodika skladsnogo ucheta) No 70524 [Copyright for a scientific work (method of adjusting the content of the elemental composition of steel) No 70524], 2017. (in Ukrainian).
12. Togobitskaya D.N., Piptyuk V.P. & Logozinskiy I.N. et al. (2015). Sistemnyy podkhod k vyboru optimal'nogo elementnogo sostava stali, obespechivayushchiy trebuyemyy uroven' mekhanicheskikh svoystv [A systematic approach to the choice of the optimal elemental composition of steel, providing the required level of mechanical properties]. *Sistemnyye tekhnologii. Regional'nyy sbornik nauchnykh trudov [System technologies. Regional collection of scientific papers]*. 2015, 2 (97), 91-97. (In Russian).
13. Togobitskaya D.N., Piptyuk V.P. & Kuksa O.V. et al. (2016). Mikrolegirovaniye stali 14KH17N2 borom v usloviyakh PAO «Dneprospeetsstal» [Microalloying steel 14Cr17Ni2 with boron under the conditions of PJSC Dneprospeetsstal]. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost' [Metallurgical and mining industry]*. 2016, 1, 40-45. (In Russian).
14. Babachenko A.I., Togobitskaya D.N. & Kozachek A.S. (2014). Fiziko-khimicheskiye kriterii i modeli dlya otsenki vliyaniya khimicheskogo sostava na svoystva kolesnoy stali [Physicochemical criteria and models for assessing the effect of chemical composition on the properties of wheel steel]. *Naukovî vîstî. Suchasni problemi metalurgii [Scientific news. Modern problems of metallurgy]*. Dnipropetrovsk, 2014, 16, 89. (In Russian).

Д.М. Тогобицкая, д.т.н., проф., зав.відділом, ORSID 0000-0001-6413-4823

А.І. Белькова, к.т.н., с.н.с., ORSID 0000-0001-8519-9351

Д.О. Степаненко, к.т.н., с.н.с., ORSID 0000-0002-0184-8295

Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2019. - Вип.33

«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33

ISSN 2522-9117 «Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii». – 2019. – Vypusk 33

Розвиток Бази Знань для моделювання фізико-хімічних властивостей металургійних систем та процесів

Анотація. В Інституті чорної металургії створена База знань «Металургія» (БДМет), яку можна використовувати для моделювання фізико-хімічних властивостей металургійних систем і процесів на базі сучасних інформаційних комп'ютерних технологій. Метою роботи є розвиток фундаментальних основ і виявлення основних напрямків розвитку БДМет, розширення уявлення інформації фундаментальної, технологічної та нормативно-довідкової спрямованості для аналізу і багатокритеріальної оптимізації технологічних процесів. Складовою частиною БДМет є також База моделей металургійних систем і технологічних процесів, прикладне та програмне забезпечення теоретичних досліджень. База даних містить експериментальні дані фізико-хімічних властивостей металевих і шлакових розплавів, що утворюються з відповідних шихтових матеріалів в відновлювальних і окислювальних умовах. Показані результати актуальних наукових і прикладних розробок відділу фізико-хімічних проблем металургійних процесів. Відзначено, що наявність в БДМет фонду моделей по переділах і єдина методологія їх створення за модульним принципом дозволяє забезпечити генерацію моделей в єдину наскрізну модель, виявити оптимальну схему металургійних процесів і забезпечити виробництво металу заданого якості в рамках наскрізної технології. Показано, що використання дозволяє вирішувати завдання оптимізації технологічних процесів виробництва чавуну і сталі. Визначено перспективи розвитку подальших досліджень для системного накопичення в базах документально-фактографічних даних і експериментальної інформації про властивості металевих і шлакових розплавів, а також їх подальшого використання в відновлювальних і окислювальних процесах металургійного виробництва.

Ключові слова: база даних, база моделей, база знань, фізико-хімічне і математичне моделювання, фізико-хімічні властивості систем, металургійні процеси.

D.N. Togobitskaya, Dr. Sci., professor, Head of Department, ORSID 0000-0001-6413-4823

A.I. Belkova, PhD, Senior Researcher, ORSID 0000-0001-8519-9351

D.A. Stepanenko, PhD, Senior Researcher, ORSID 0000-0002-0184-8295

Iron and Steel Institute named after Z.I. Nekrasov of the NAS of Ukraine

Development of a knowledge base for modeling the physicochemical properties of metallurgical systems and processes

Summary. The Institute of Ferrous Metallurgy created the Knowledge Base "Metallurgy" (BDMet). It can be used to model the physicochemical properties of metallurgical systems and processes based on modern computer information technology. The aim of the work is to develop the fundamental foundations and identify the main directions of development of PMD, expand the presentation of fundamental, technological and regulatory reference information for analysis and multi-criteria optimization of technological processes. A component of BDMet is also the Base of models of metallurgical systems and technological processes, applied and theoretical

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2019. - Вип.33

«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33

ISSN 2522-9117 *«Fundamental'nye i prikladnye problemy černoј metallurgii». – 2019. – Vypusk 33*

research software. The database contains experimental data on the physicochemical properties of metal and slag melts formed from the corresponding charge materials in reducing and oxidizing conditions. The results of relevant scientific and applied developments of the department of physicochemical problems of metallurgical processes are shown. It is noted that the presence in the BDMet of the stock of models according to redistribution and a unified methodology for their creation on a modular basis allows the generation of models into a single end-to-end model. It also allows you to identify the optimal scheme of metallurgical processes and ensure the production of metal of a given quality in the framework of end-to-end technology. It is shown that the use allows us to solve the problems of optimization of technological processes for the production of iron and steel. The prospects for the development of further studies for systemic accumulation in the databases of documentary factual data and experimental information on the properties of metal and slag melts, as well as their further use in reduction and oxidation processes of metallurgical production, are determined.

Keywords: database, model database, knowledge base, physicochemical and mathematical modeling, physicochemical properties of systems, metallurgical processes.

For citation: *Togobitskaya D.N., Bel'kova A.I., Stepanenko D.A. Razvitiye bazy znaniy dlya modelirovaniya fiziko-khimicheskikh svoystv metallurgicheskikh sistem i protsessov. [Development of a knowledge base for modeling the physical and chemical properties of metallurgical systems and processes.]. «Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii».[Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy] 2020, 34. 193-204. (In Russian). . DOI 10.52150/2522-9117-2019-33-193-204*

*Статья поступила в редакцию сборника 17.10.2019 года,
прошла внутреннее и внешнее рецензирование (Протокол заседания
редакционной коллегии сборника №2 от 23 декабря 2019 года)*

А.Ф. Петров, н.с., ORSID 0000-0001-7855-9267

И.Р. Снигура, м.н.с., ORSID 0000-0001-5872-7403

Л.А. Головкин, к.х.н., с.н.с., ORSID 0000-0002-3872-5950

Н.А. Цюпа, к.т.н., с.н.с.

Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВРЕМЕНИ ПЛАВЛЕНИЯ КОМПЛЕКСНЫХ ФЕРРОСПЛАВОВ МЕТОДОМ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Аннотация. Целью работы является реализация нового подхода к описанию продолжительности плавления (растворения) комплексных ферросплавов нового поколения при раскислении и легировании металлического расплава. Этот подход ориентирован на разработку методики и критериев для количественной оценки и учета микронеоднородности многокомпонентных металлических расплавов и прогнозирования на их основе такой важной для сталеплавильного производства характеристики, как время плавления ферросплавов, описание межатомного взаимодействия в которых позволяет глубже понять механизм процессов легирования, раскисления и рафинирования стали. В работе использован разработанный в Институте черной металлургии НАН Украины подход к решению задач моделирования закономерностей, которые связывают между собой состав, структуру и свойства расплавов. В его основе лежит оригинальная концепция физико-химического моделирования процессов межатомного взаимодействия в расплавах и растворах, разработана Е.В. Приходько. Согласно ей, металлические расплавы рассматриваются как химически единые системы. Изменение их состава сказывается на комплексе физико-химических свойств через изменение параметров их электронной структуры. Для оценки и учета влияния микронеоднородности строения металлических расплавов ферросплавного производства применена методика расчета критериев ($\Delta Z'$ и Δd), характеризующие степень различия электронного и структурного состояния расплава, как химически единой системы, от механической смеси их исходных компонентов и параметр ρl , учитывающий кластерообразование в металлических расплавах. С использованием указанных критериев и имеющихся экспериментальных данных получены аналитические зависимости для расчета времени плавления комплексных (марганец, ванадий, ниобий и борсодержащих) ферросплавов нового поколения. Это позволит оценить их эффективность применения, связанную с максимально высоким усвоением основных элементов, влияет на расход сплава, стабильность и стоимость обрабатываемого металла.

Ключевые слова: ферросплавы, металлические расплавы, параметры межатомного взаимодействия, прогнозные модели

Ссылка для цитирования: Петров А.Ф., Снигура И.Р., Головки Л.А., Цюпа Н.А. Прогнозирование времени плавления комплексных ферросплавов методом физико-химического моделирования //«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2019. - Вып.33. – С.205-214. (In Russian). DOI 10.52150/2522-9117-2019-33-205-214

Состояние проблемы. Время плавления является одной из важнейших характеристик ферросплавов, которая позволяет определить как степень эффективности их усвоения, так и распределения ведущих элементов сплава в железоуглеродистом расплаве. Создание новых марок ферросплавов, определение способов их ввода в сталь тесно связаны с необходимостью изучения их свойств зависящих от комплекса физико-химических индивидуальных особенностей добавок. В настоящее время существуют различные экспериментальные и расчетные методы изучения времени плавления ферросплавов. Экспериментальные методы чаще всего связаны с измерением скорости изменения массы образца ферросплава путем непрерывного или периодического взвешивания [1,2].

Анализ литературных данных по экспериментальным методам определения времени плавления свидетельствует не только о важности для сталеплавильного производства данного параметра, но и о том, что они сложны, недостаточно учитывают реальные условия растворения ферросплавов и в ряде случаев имеют неудовлетворительную точность. В научной литературе достаточно широко используются методы математического моделирования плавления кусковых ферросплавов в жидкой стали [3,4]. В этих работах решается система дифференциальных уравнений с соответствующими граничными и начальными условиями. Обладая удовлетворительной сходимостью с практикой, они все же сложны для оперативного использования в промышленных условиях.

Цель работы – выявление влияния химического состава комплексных ферросплавов на время их плавления с целью выбора наиболее оптимальной композиции легирующих и рафинирующих элементов.

Основной материал исследования.

В настоящей работе на основе оригинальной концепции направленной химической связи разработанной Приходько Э.В. рассмотрена возможность прогнозирования времени плавления комплексных ферросплавов [5,6].

Для численных расчетов и исследования взаимосвязи между составом, строением и свойствами расплавов ферросплавного производства предлагается принять основные положения концепции направленной химической связи, согласно которым расплав – это целостная химически единая система и ввести в качестве модельных параметры межатомного взаимодействия (Z^y – параметр зарядового

состояния системы, e ; d – среднестатистическое межъядерное расстояние, 10^{-1}нм ; $tg\alpha$ – константа для каждого элемента, характеризующая градиент изменения радиуса иона при изменении его заряда; ρ_l – средневзвешенная направленная зарядовая плотность атомов в системе, e/нм).

Как показывает многолетний опыт использования методики «свертки» химического состава на основе параметров межатомного взаимодействия является эффективным научно-обоснованным подходом для направленного формирования свойств металлических расплавов.

Расчет интегральных параметров для металлических расплавов проводится в специализированном проблемно-ориентированном комплексе «Металл» (рис. 1).

The screenshot shows the 'METALL' software interface. It has a menu bar with 'Ввод', 'Чет', 'Запись', 'Печать', 'Информация', and 'Выход'. Below the menu is a 'Точка M' section with 'Парциальные параметры' and 'Интегральные параметры' tabs. The 'Парциальные параметры' tab shows a table of parameters for elements S, P, B, C, and Fe. The 'Интегральные параметры' tab shows a table of integrated parameters for the same elements. At the bottom, there is a section for 'Средние заряды элементов' and 'Средние зарядовые плотности'.

Связь	Km	dm	de	Za	Zb	Ra	Rb
S-S	0.717	2.064	-2.61	-2.0	-0.6	1.42	1.33
P-S	0.357	2.193	-2.01	-1.4	-0.6	1.40	1.35
B-P	0.891	1.870	-2.53	-0.4	-2.2	1.08	1.67
B-S	0.642	2.024	-1.96	-0.3	-1.6	1.06	1.69
C-P	1.011	1.505	-4.95	-3.5	-1.5	1.31	1.43
C-S	1.307	1.586	-4.40	-3.5	-0.9	1.32	1.42

N	a	Tg(a)	Zy
1	2.7901	0.0881	1.219
2	2.7089	0.0883	1.176
3	2.7887	0.0880	1.225
4	2.7475	0.0886	1.201

N	Компонент	Zc
6	B	-0.194
7	C	-3.366
8	P	-1.133
9	S	-0.494

N	Компонент	x1	ap1
6	B	2.210	-0.1290
7	C	2.870	-1.3218
8	P	3.429	-0.9641
9	S	3.340	-0.4015

Хотите просмотреть результаты расчета? Y - <Да>, N - <Нет>

Рисунок 1 – Видеокادر вывода результатов расчетов параметров межатомного взаимодействия в программе «Металл»

Рассчитанные значения модельных параметров для некоторых комплексных марганецсодержащих ферросплавов на основе данных работы [7] представлены в табл. 1.

Анализ взаимосвязей параметров межатомного взаимодействия с временем плавления марганецсодержащих ферросплавов позволил установить, что наиболее информативным является параметр микронеоднородности ρ_l , который учитывает кластерообразование в металлических расплавах, как показано в работе [8].

Учет микронеоднородности металлических расплавов (рис. 2, а, б) является важным резервным потенциалом для расширения описательных возможностей физико-химических процессов протекающих на границе раздела «добавка-металл-шлак», повышения качества металлопродукции и технико-экономических показателей плавки.

Поиск путей учета влияния микронеоднородности расплавов на их свойства зависит от выбранной для анализа теории, концепции, модели строения металлического расплава. Так, например, в работе [9] предложено использовать избыточные параметры (ΔZ^y , Δd) по которым оценивали степень отличия процессов взаимодействия в расплавах, как химически единых системах от аналогичных параметров, свойственных механическим смесям. Эти параметры оказались эффективными для ниобийсодержащих ферросплавов.

Таблица 1 – Химический состав и модельные параметры комплексных марганецсодержащих ферросплавов по данным [7]

№	Ферросплавы	Химический состав, % вес.					Модельные параметры			
		<i>Mn</i>	<i>V</i>	<i>Si</i>	<i>Nb</i>	<i>Al</i>	<i>Z'</i>	<i>d</i>	<i>tg α</i>	<i>ρl</i>
1	ФМн20Н6	20,0	–	–	20,0	–	1.8606	2.9337	0.0834	3.5900
2	ФМн30Н6	30,0	–	–	17,5	–	1.9198	2.9318	0.0832	3.5947
3	ФН6САМн5	5,0	–	11,4	17,1	16,6	1.7718	2.7315	0.1053	3.2781
4	ФН6САМн15	15,0	–	10,2	14,9	15,3	1.8294	2.7518	0.1037	3.2934
5	ФН6САМн30	30,0	–	8,4	12,3	12,6	1.8878	2.7793	0.1004	3.3447
6	ФС26Вд9Мн5	5,0	9,5	26,5	–	–	1.8361	2.5315	0.0879	3.9098
7	ФС25Вд9Мн10	10,0	9,0	25,0	–	–	1.8737	2.5515	0.0876	3.8909
8	ФС26Вд9МнTi3	4,8	9,2	26,0	–	–	1.8606	2.5509	0.0878	3.8827
9	ФС25Вд9МнTi3	4,9	8,9	25,2	–	–	1.8853	2.5721	0.0877	3.8545
10	ФМн50Вд10	50,0	10,0	3,0	–	–	1.9428	2.8481	0.0838	3.6425

* Остальное железо. Сплав №8 и №9 содержат соответственно 3 и 6% Ti

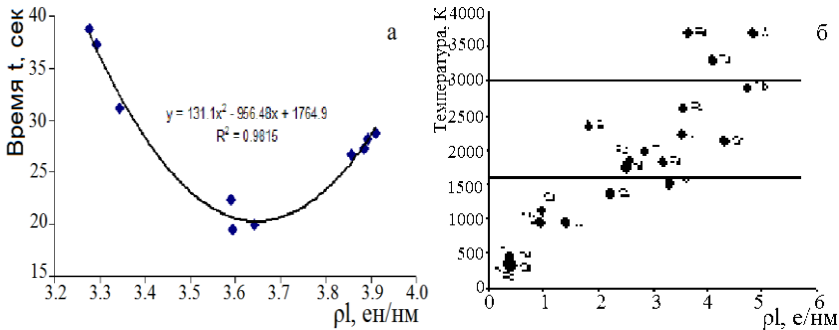


Рисунок 2 – Зависимость: а) – времени плавления марганецсодержащих ферросплавов от направленной зарядовой плотности; б) – температуры существования кластера однокомпонентных металлических расплавов от параметра ρl

С учетом указанной информации и использованием экспериментальных данных [10] в качестве реперных точек, методом корреляционно-регрессионного анализа были получены аналитические зависимости (1-4) для определения времени плавления комплексных ферросплавов систем $Fe-Mn-V$, $Fe-Mn-Nb$, $Fe-Nb-Si$, $Fe-Nb-Al$, $Fe-Si-B$, $Fe-Mn-Si-V$, $Fe-Nb-Si-Al$, $Fe-Si-V-Mn$, $Fe-Mn-Si-V-Ti$, $Fe-Mn-Si-Nb-Al$. Показано, что изменение времени полного расплавления различных групп комплексных ферросплавов описываются следующими уравнениями:

$$\text{Для марганецсодержащих ферросплавов:} \\ \tau, c = f(\rho l) \quad R^2 = 0.982 \quad (1)$$

$$\text{Для ванадийсодержащих ферросплавов:} \\ \tau, c = f(\rho l, \text{tg } \alpha) \quad R^2 = 0.692 \quad (2)$$

$$\text{Для ниобийсодержащих ферросплавов:} \\ \tau, c = f(Z^y, d, \Delta Z^y, \Delta d) \quad R^2 = 0.725 \quad (3)$$

$$\text{Для борсодержащих ферросплавов:} \\ \tau, c = f(\rho l, d) \quad R^2 = 0.903 \quad (4)$$

Высокий коэффициент корреляции ($R^2 = 0,69-0,99$) с параметрами межатомного взаимодействия достигнут за счет учета физико-химической индивидуальности каждой системы ферросплавов, микронеоднородности (ρl), (ΔZ^y , Δd).

Для марганецсодержащих ферросплавов $R^2 = 0.982$, а ошибка точности прогноза не превышает $\Sigma \zeta, \% = 2,7$, что подтверждает адекватность модели.

Полученные данные свидетельствуют о достаточно высокой сходимости экспериментальных и расчетных значений рассматриваемых характеристик ферросплавов. Это подтверждает возможность применения

полученных уравнений (1-4) для прогнозной оценки времени плавления комплексных ферросплавов нового поколения, выбора на этой основе оптимального их химического состава.

Выводы.

С использованием предложенной методики и критериев показана возможность прогнозной оценки одной из важнейших характеристик комплексных ферросплавов нового поколения.

Получены аналитические зависимости для расчета времени плавления комплексных (марганец, ванадий, ниобий и борсодержащих) ферросплавов нового поколения, что позволят обеспечить решение задач выбора ведущих микролегирующих элементов сплава и их лучшего усвоения в железоуглеродистом расплаве.

Библиографический список

1. Вихлевщук В.А. Экспериментальное исследование микролегирующих ферросплавов и лигатур в стали / В.А. Вихлевщук, В.П. Пиптюк, В.А. Кондрашкин, Ю.Б. Бадогин // Сборник трудов «Производство стали в конвертерных и мартеновских цехах». – М.: Металлургия. – 1988. – С. 75-80.
2. Игнатьев В.С. Изучение свойств ферросплавов и лигатур для микролегирования и раскисления стали / В.С. Игнатьев, В.А. Вихлевщук, В.М. Черногорецкий [и др.] // Изв. ВУЗов. Черная металлургия. – 1988. – № 6. – С. 37-42.
3. Носков А.С., Жучков В.И., Завьялов А.Л. Плавление ферросплавов в железоуглеродистом расплаве // Изв. ВУЗов. Черная металлургия. – 1985. – № 10. – С. 32-37.
4. Игнатьев В.С. Изучение свойств ферросплавов и лигатур для микролегирования и раскисления стали / В.С. Игнатьев, В.А. Вихлевщук, В.М. Черногорецкий [и др.] // Изв. ВУЗов. Черная металлургия. – 1988. – № 6. – С. 37-42.
5. Приходько Э.В. Прогнозирование физико-химических и теплофизических свойств ферросилиция стандартных марок / Э.В. Приходько, В.П. Пиптюк, А.Ф. Петров, С.В. Греков // «Металлургическая и горнорудная промышленность». – Днепропетровск. – 2009. – №5. – С. 17-20.
6. Приходько Э.В., Петров А.Ф. Методика прогнозирования физических и теплофизических свойств марганцевых ферросплавов в зависимости от состава // «Металлургическая и горнорудная промышленность». – Днепропетровск. – 2008. – №6. – С. 27-30.
7. Жучков В.И., Носков А.С., Завьялов А.Л. Растворение ферросплавов в жидком металле // Свердловск: УНЦ АН СССР. – 1990. – 134 с.
8. Тогобицкая Д.Н., Головкин Л.А., Снигура И.Р. Исследование микронеоднородности однокомпонентных металлических расплавов в области надликвидусных температур на основе параметров межатома взаимодействия. // VII Международная научно-практическая конференция «Наука в современном мире» – Киев, 19 марта 2016 г. – С. 37 – 44

9. Петров А.Ф., Приходько Э.В., Ворона Е.Н. Физико-химические критерии для прогнозирования термодинамических свойств многокомпонентных металлических систем // Сб. научн. тр. ИЧМ НАНУ «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии». – Днепропетровск. – 2005. – Вып.11. – С. 170–179.
10. Петров А.Ф. Прогнозирование физико-химических и теплофизических свойств борсодержащих ферросплавов / А.Ф. Петров, О.В. Кукса, Л.А. Головкин, С.В. Греков // «Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць». – Дніпро: – 2016. – №2(103). – С. 44–49.

References

1. Vihlevshuk V.A., Piptyuk V.P., Kondrashkin V.A. & Badogin Yu.B. (1988). Eksperimentalnoe issledovanie mikrolegirovaniya ferrosplavov i ligatur v stali [Experimental study of microalloying ferroalloys and master alloys in steel]. *Sbornik trudov «Proizvodstvo stali v konvertirnykh i martenovskikh cehakh»* [Collection of works "Steel production in converter and open-hearth shops"], Moskva: Metallurgiya, 1988, pp.75-80. (In Russian).
2. Ignatev V.S., Vihlevshuk V.A. & Chernogreckij V.M. et al. (1988). Izuchenie svoystv ferrosplavov i ligatur dlya mikrolegirovaniya i raskisleniya stali [Study of the properties of ferroalloys and master alloys for microalloying and deoxidation of steel]. *Izv. VUZov. Chernaya metallurgiya* [Izvestiya. Ferrous metallurgy], 1988, 6, 37-42. (In Russian).
3. Noskov A.S., Zhuchkov V.I. & Zavyalov A.L. (1985). Plavlenie ferrosplavov v zhelezouglerodistom rasplave [Melting of ferroalloys in iron-carbon melt]. *Izv. Vuzov. Chernaya metallurgiya* [Izvestiya. Ferrous metallurgy], 1985, 10, 32-37. (In Russian).
4. Ignatev V.S., Vihlevshuk V.A. & Chernogreckij V.M. et al. (1988). Izuchenie svoystv ferrosplavov i ligatur dlya mikrolegirovaniya i raskisleniya stali [Study of the properties of ferroalloys and ligatures for microalloying and deoxidation of steel]. *Izv. Vuzov. Chernaya metallurgiya* [Izvestiya. Ferrous metallurgy], 1988, 6, 37-42. (In Russian).
5. Prihodko E.V., Piptyuk V.P., Petrov A.F. & Grekov S.V. (2009). Prognozirovaniye fiziko-himicheskikh i teplo-fizicheskikh svoystv ferrosilitsiya standartnykh marok [Prediction of physical, chemical and thermophysical properties of standard ferrosilicon grades]. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost* [Metallurgical and mining industry], Dnepropetrovsk, 2009, 5, 17-20. (In Russian).
6. Prihodko E.V. & Petrov A.F. (2008). Metodika prognozirovaniya fizicheskikh i teplofizicheskikh svoystv margancevykh ferrosplavov v zavisimosti ot sostava [Methodology for predicting the physical and thermophysical properties of manganese ferroalloys, depending on the composition]. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost* [Metallurgical and mining industry], Dnepropetrovsk, 2008, 6, 27-30. (In Russian).
7. Zhuchkov V.I., Noskov A.S. & Zavyalov A.L. (1990). *Rastvorenije ferrosplavov v zhidkom metalle* [Dissolution of ferroalloys in liquid metal]. Sverdlovsk: UNC AN SSSR, 1990, 134 p. (In Russian).

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2019. - Вип.33

«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33

ISSN 2522-9117 «Fundamental'nye i prikladnye problemy černoј metallurgii». – 2019. – Vypusk 33

8. Togobickaya D.N., Golovko L.A. & Snigura I.R. Issledovanie mikroneodnorodnosti odnokomponentnykh metallicheskh rasplavov v oblasti nadlikvidusnykh temperatur na osnove parametrov mezhatomnogo vzaimodeystviya [Study of microheterogeneity of one-component metal melts in the region of supra-liquidus temperatures based on the parameters of interatomic interaction]. *VII Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferenciya «Nauka v sovremennom mire» 19 marta 2016 g [VII International Scientific and Practical Conference "Science in the Modern World"]*. Kiev, 37–44. (In Russian).
9. Petrov A.F., Prihodko E.V. & Vorona E.N. (2005). Fiziko-himicheskie kriterii dlya prognozirovaniya termodinamicheskikh svoystv mnogokomponentnykh metallicheskh system [Physicochemical criteria for predicting the thermodynamic properties of multicomponent metal systems]. *Fundamental'nyye i prikladnyye problemy chernoy metallurgii. Sb. nauchn. tr. ICHM. [Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy. Collection of scientific articles ISI NANU]*. Dnepropetrovsk, 2005, 11, 170–179. (In Russian).
10. Petrov A.F., Kuksa O.V., Golovko L.A. & Grekov S.V. (2016). Prognozirovanie fiziko-himicheskikh i teplofizicheskikh svoystv borsoderzhashih ferrosplavov [Prediction of physicochemical and thermophysical properties of boron-containing ferroalloys]. *Sistemni tehnologii. Regionalnij mizhvuzivskij zbirnik naukovih prac [System technologies. Regional interuniversity collection of scientific works]*. Dnipro, 2016, 2(103), 44–49. (In Russian).

А.Ф. Петров, н.с., ORSID 0000-0001-7855-9267

І.Р. Снігура, м.н.с., ORSID 0000-0001-5872-7403

Л.А. Головко, к.х.н., с.н.с., ORSID 0000-0002-3872-5950

Н.О. Цюпа, к.т.н., с.н.с.

Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України

Прогнозування часу плавлення комплексних феросплавів методом фізико-хімічного моделювання

Анотація. Метою роботи є реалізація нового підходу до опису тривалості плавлення (розчинення) комплексних феросплавів нового покоління при розкисненні та легуванні металевого розплаву. Цей підхід орієнтований на розробку методики та критеріїв для кількісної оцінки і обліку мікронеоднорідності багатокomпонентних металевих розплавів і прогнозування на їх основі такої важливої для сталеплавильного виробництва характеристики, як час плавлення феросплавів, опис міжатомної взаємодії в яких дозволяє глибше зрозуміти механізм процесів легування, розкислення, та рафінування сталі. У роботі використаний розроблений в Інституті чорної металургії НАН України підхід до вирішення завдань моделювання закономірностей, які пов'язують між собою склад, структуру і властивості розплавів. В його основі лежить оригінальна концепція фізико-хімічного моделювання процесів міжатомної взаємодії в розплавах і розчинах, розроблена Е.В. Приходько. Відповідно до неї, металеві розплави розглядаються як хімічно єдині системи. Зміна їх складу позначається на комплексі фізико-хімічних властивостей через зміну параметрів їх електронної

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2019. - Вип.33

«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33

ISSN 2522-9117 *«Fundamental'nyye i prikladnyye problemy černoj metallurgii». – 2019. – Vypusk 33*

структури. Для оцінки та обліку впливу мікронеоднорідності будови металевих розплавів феросплавного виробництва застосована методика розрахунку критеріїв ($\Delta Z'$ і Δd), що характеризують ступінь відмінності електронного і структурного стану розплаву, як хімічно єдиної системи, від механічної суміші їх вихідних компонентів та параметр ρl , який враховує кластероутворення в металевих розплавах.

З використанням вказаних критеріїв і наявних експериментальних даних отримано аналітичні залежності для розрахунку часу плавлення комплексних (марганець, ванадій, ніобій і бормістких) феросплавів нового покоління. Це дозволить оцінити їх ефективність застосування, пов'язану з максимально високим засвоєнням основних елементів, що впливає на витрату сплаву, стабільність і вартість оброблюваного металу.

Ключові слова: феросплави, металеві розплави, параметри міжатомної взаємодії, прогнознi моделі

A.F. Petrov, Researcher, ORCID 0000-0001-7855-9267

I.R. Snihura, Junior Researcher, ORCID 0000-0001-5872-7403

L.A. Golovko, PhD in Chemistry, Senior Researcher, ORCID 0000-0002-3872-5950

N.A. Tsyupa, PhD (Engin.), Senior Researcher,

Iron and Steel Institute named after Z.I. Nekrasov of the NAS of Ukraine

Prediction of melting time of complex ferroalloys by physical and chemical modeling

Summary. The purpose of this work is to implement a new approach to the description of the duration of melting (dissolution) of complex new generation ferroalloys during the deoxidation and doping of a metal melt. This approach is aimed at developing a methodology and criteria for the quantification and accounting of the micro-heterogeneity of multicomponent metal melts and their prediction on such important for steelmaking production characteristics as the melting time of ferroalloys, the description of the inter-mine interaction, which allows a deeper understanding of the process. deoxidation and refining of steel. In the work, the approach developed in the Institute of Ferrous Metallurgy of the National Academy of Sciences of Ukraine to solve problems of modeling of non-conformities that relate the composition, structure and properties of melts is used in the work. It is based on the original concept of physicochemical modeling of the processes of interatomic interaction in melts and solutions, developed by E.V. Prihodko. According to it, metal melts are considered as chemically unified systems. Changing their composition affects the complex of physicochemical properties due to changes in the parameters of their electronic structure. The method of calculation of criteria ($\Delta Z'$ and Δd), characterizing the degree of difference between the electronic and structural state of the melt, as a chemically unified system, from the mechanical mixture of their initial components and the parameter was used to evaluate and account for the influence of the micron homogeneity of the structure of the metal melts of ferroalloy production. ρl , which takes into account the cluster spin in metal melts.

Using these criteria and the available experimental data, analytical dependences were obtained to calculate the melting time of complex (ma-manganese, vanadium, niobium and boromatic) ferroalloys of the new generation. This will allow them to evaluate their effectiveness of application, which is associated with the highest assimilation of the main elements that affect

Keywords: ferroalloys, metal melts, parameters of interatomic interaction, predictive models

For citation: Petrov A.F., Snigura I.R., Golovko L.A., Tsyupa N.A. Prognozirovaniye vremeni plavleniya kompleksnykh ferrosplavov metodom fiziko-khimicheskogo modelirovaniya. [Prediction of the melting time of complex ferroalloys by the method of physical and chemical modeling.]. «*Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii*». [Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy] 2020, 34. 205-214. (In Russian). DOI 10.52150/2522-9117-2019-33-205-214

*Статья поступила в редакцию сборника 17.10.2019 года,
прошла внутреннее и внешнее рецензирование (Протокол заседания
редакционной коллегии сборника №2 от 23 декабря 2019 года)*

Д.О. Степаненко, к.т.н., с.н.с., ORSID 0000-0002-0184-8295

О.С. Скачко, к.т.н., н.с.,

Н.О. Цюпа, к.т.н., с.н.с.,

І.Р. Снігура, м.н.с., ORSID 0000-0001-5872-7403

Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України

О.В. Яковицький, н.с. ORSID 0000-0002-9540-303

Дніпропеєцсталь, ПАТ Електрометалургійний завод ім. Кузьміна

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕМПЕРАТУР ПЛАВЛЕННЯ CaF₂, ПЕГМАТИТУ ТА ЇХ СУМІШЕЙ З ВАПНОМ

Анотація. У наш час одним з актуальних питань є проблема зниження матеріальних і енергетичних витрат при виробництві тих чи інших видів продукції. Особливого значення набувають питання шлакоутворення у зв'язку з освоєнням на установці ківш-піч (УКП) виплавки спеціальних і легованих марок сталі з жорсткими вимогами до вмісту шкідливих домішок. Тому питання вибору раціонального складу шлакоутворюючої суміші (ШУС) потребує особливої уваги. Метою даної роботи є виконання досліджень з вирішенням проблем підвищення якості і конкурентоспроможності виробленої металопродукції. У роботі представлені аналітичні та експериментальні дослідження фазового складу та температури плавлення системи CaF₂-CaO, яка є основою шлакоутворюючої суміші для рафінування сталі в ковші на вітчизняних металургійних підприємствах. Виконані раніше дослідження по заміні плавикового шпату в складі ШУС на мінеральну сировину вітчизняного родовища показали, що альтернативою є застосування пегматиту Єлісїївського родовища (Запорізька обл.), що містить оксиди лужних металів Na₂O та K₂O, які впливають як на зниження в'язкості шлаків металургійного виробництва, так і проявляють ефект десульфурзації металевого розплаву. Виконані експериментальні дослідження температур плавлення плавикового шпату, пегматиту та їх сумішей з вапном. Також, у якості підкладки, на якій відбувався процес плавлення досліджуваних матеріалів та їх сумішей, використовували корунд та периклазовуглецевий вогнетрив, який, за звичай, використовують при футерівці шлакового поясу ковшів УКП. Показано, що пегматит сприятливо впливає на процес розрідження вапна та формування шлакового розплаву і може використовуватися у якості компонента ШУС. Використання пегматиту може повністю або частково замінити плавиковий шпат у складі шлакової суміші з вапном.

Ключові слова: шлакоутворюючі суміші, пегматит, вапно, фазовий склад, температура плавлення, шлаковий розплав, рафінування сталі, корунд, периклазовуглецевий вогнетрив, оксиди лужних металів.

Посилання для цитування: Степаненко Д.О., Яковицький О.В., Скачко О.С., Цюпа Н.О., Снігура І.Р. Експериментальні дослідження температур плавлення CaF₂, пегматиту та їх сумішей з вапном. // «Фундаментальні та прикладні

Стан проблеми. У кризових умовах економіки найбільш значущим є пошук технічних і технологічних рішень, спрямованих на виявлення і використання додаткових можливостей для зниження матеріальних і енергетичних витрат при виробництві тих чи інших видів продукції. Металургійна галузь і її сталеплавильний переділ належать до одних з найбільш ресурсо- та енерговитратних виробництв, а з урахуванням обсягів виробленої металопродукції вплив масштабного чинника набуває загальнодержавного значення.

Метою роботи є виконання досліджень з вирішенням проблем ресурсо- і енергозбереження, підвищення якості і конкурентоспроможності виробленої металопродукції, оскільки це є актуальним і затребуваним з наукової та практичної точок зору.

Основний матеріал дослідження. Виробництво сталі у відповідності до нормативних вимог забезпечується на етапі її позапічної обробки на установці ківш-піч (УКП). Процеси рафінування та доведення сталі у сталерозливному ковші характеризуються високою інтенсивністю, що вимагає високої швидкості шлакоутворення та дифузійних процесів в системі «метал-шлак».

Особливе значення в даний час набувають питання шлакоутворення у зв'язку з освоєнням на УКП виплавки більш відповідальних, спеціальних і легованих марок сталі з жорсткими вимогами до вмісту шкідливих домішок. Тому питання вибору раціонального складу шлакоутворюючої суміші (ШУС) потребує особливої уваги.

Одним з напрямків наукових пошуків підвищення ефективності рафінування сталі на вітчизняних металургійних підприємствах та зниження її собівартості є скорочення питомої витрати плавикового шпату у складі ШУС ($\text{CaO} \approx 75\%$ і $\text{CaF}_2 \approx 25\%$). При аналізі впливу фториду кальцію, що міститься в шлаках позапічної (ковшової) обробки сталі, відзначають позитивний вплив його на зниження температури плавлення і, відповідно, в'язкості ковшових шлаків, що формуються з твердих шлакоутворюючих матеріалів. До недоліків відносять підвищену питому витрату вогнетривких матеріалів, високу ціну імпортованого плавикового шпату, негативний вплив CaF_2 і фторидних летючих з'єднань на навколишнє середовище [1].

Зазначені недоліки застосування плавикового шпату (зниження стійкості футерівки ковшів, утворення летючих фторвмісних з'єднань) є особливістю позапічної обробки, тому ведуться дослідження і розробка технологічних рішень для зменшення їх шкідливого впливу. У ряді досліджень вперше акцентовано увагу на вплив високих концентрацій

фтористого кальцію в шлаках позапічної обробки, що виражається в підвищенні активності оксиду заліза (a_{FeO}) і, отже, рівноважного вмісту розчиненого кисню в металі.

Н.М. Чуйко і В.Б. Рутковський [2, 3], ймовірно, вперше у вітчизняній літературі обґрунтували, що коефіцієнт десульфурзації сталі оксидно-фторидними шлаками з підвищеним CaF_2 не збільшується, а знижується, що пояснювалося підвищенням активності закису заліза в шлаці.

В останні роки активізувалися дослідження у напрямку науково обґрунтованих пошуків скорочення (або виключення) застосування плавикового шпату для формування шлаків з твердих матеріалів для позапічної обробки сталі і чавуну.

Виконані в роботі [4] дослідження фазового складу системи CaF_2 - CaO (рис. 1) і оцінки розчинності CaO в CaF_2 відзначена помітна розчинність CaO в твердих речовинах α - і β - CaF_2 при температурах понад 1000°C . Максимальна розчинність CaO в твердому CaF_2 становить близько 5 мол.% при евтектичній температурі (близько 1362°C), у той час як розчинність CaF_2 у твердому CaO не встановлено.

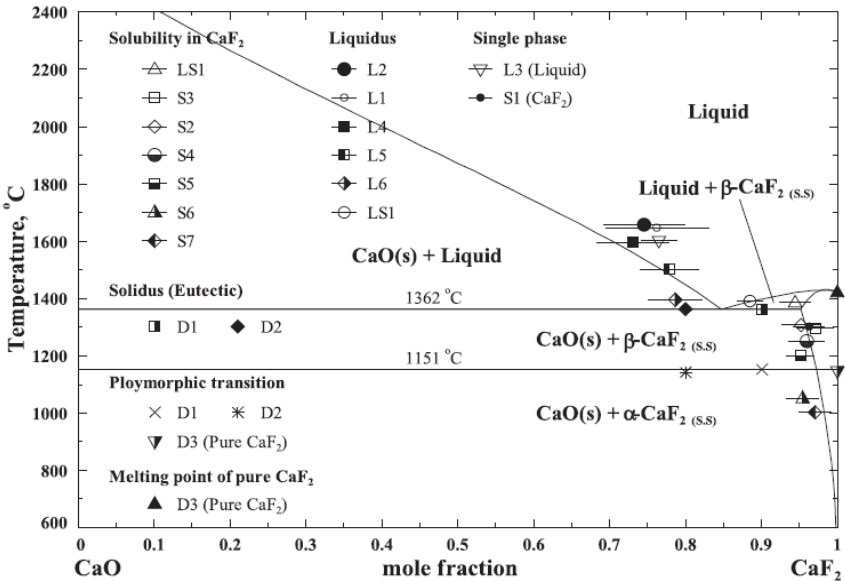
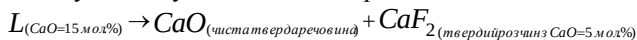


Рисунок 1 – Діаграма фазового стану системи CaO - CaF_2 за даними [4]

На основі термодинамічної оптимізації та вимірювань евтектичної температури для розплавів системи CaO - CaF_2 , у роботі [4] зроблено

висновок про те, що система $\text{CaO}-\text{CaF}_2$ при 1361 °С являє собою просту евтектичну систему з евтектичною реакцією:



Виходячи з наведеного вище аналізу літературних даних про фазовий склад оксидної системи $\text{CaO}-\text{CaF}_2$, що є основою вітчизняних шлакоутворюючих сумішей при позапічній обробці сталі, слідує – структура розплаву системи $\text{CaO} \approx 75\%$ і $\text{CaF}_2 \approx 25\%$ при температурах технологічного процесу знаходиться в гетерогенному стані і представлена твердими частинками CaO і рідиною. Наявність нерозчинного вапна (CaO) в шлаковому розплаві ускладнює перебіг масообмінних процесів у системі «метал-шлак» і як наслідок погіршуються рафінуючі властивості розплаву ШОС.

В реальних умовах позапічної обробки сталі розчинення CaO в складі ШУС (CaF_2-CaO) здійснюється за рахунок потрапляння в її розплав продуктів розкислення сталі, наявності частки пічних шлаків та при контакті розплаву з вогнетривом.

У виконаних, під керівництвом академіка НАНУ М.І. Гасика, дослідженнях [5-6] по заміні плавикового шпату в складі ШУС на мінеральну сировину вітчизняного родовища показано, що альтернативою є застосування пегматиту Єлісєєвського родовища (Запорізька обл.), що містить оксиди лужних металів Na_2O та K_2O , які впливають як на зниження в'язкості шлаків металургійного виробництва, так і проявляють ефект десульфурзації металевого розплаву.

Дослідження температур плавлення плавикового шпату (табл. 1), пегматиту (табл. 2) та їх сумішей з вапном (табл. 3) проводили у високотемпературній печі, температуру в зоні нагріву контролювали за допомогою термопари типу S, максимальна температура нагріву складала 1400 °С.

Таблиця 1 – Хімічний склад плавикового шпату марки «ФК-85» (мас. %)

Хім. склад	CaF_2	SiO_2	S	P
Мас. %	≥ 85	≤ 10	$\leq 0,30$	$\leq 0,30$

Таблиця 2 – Усереднений хімічний склад пегматиту Єлісєєвського (Запорізька обл.) родовища (мас. %)

SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	TiO_2
75,08	12,68	0,564	0,72	0,13	4,8	3,96	0,05

Таблиця 3 – Хімічний склад вапна марки «ІС-2» (мас. %)

Сорт/Хім. склад	CaO+MgO	MgO	SiO ₂	S	P
Сорт 1	≥88	≤3	≤2	≤0,08	≤0,10
Сорт 2	≥85	≤3	≤2,5	≤0,08	≤0,10

Перед початком експериментальних досліджень, матеріали подрібнювали, потім спресовували у вигляді циліндру радіусом 3 мм і висотою 4 мм. Суміші із матеріалів готували за допомогою високоточних лабораторних ваг Certus Balance CBA-150-0,02.

У якості підкладки, на якій відбувався процес плавлення досліджуваних матеріалів та їх сумішей, використовували корунд та периклазовуглецевий вогнетрив, який, за звичай, використовують при футерівці шлакового поясу ковшів УКП. Результати досліджень представлені в таблиці 4.

За результатами досліджень температури плавлення плавикового шпату і пегматиту однакові і становлять 1280°C. Дещо відрізняються температури розм'якшення даних матеріалів, так, для плавикового шпату вона коливається в діапазоні 1230 – 1260°C, а для пегматиту – 1158 °C.

Як показали результати досліджень, хімічний склад підкладки має значний вплив на механізм плавлення матеріалів. Так, при дослідженні процесу плавлення суміші вапна і плавикового шпату у співвідношенні 3:1 з використанням корундової підкладки (№3 у табл. 4) спостерігалось плавлення зразка в інтервалі температур 1348 – 1363 °C, але по завершенню експерименту та охолодженню зразка при візуальному обстеженні було видно, що зразок оплавився лише зверху, а всередині знаходилась суха, не розплавлена суміш. При цьому було видно, що підкладка мала наскрізний конічний отвір, що може свідчити про взаємодію Al₂O₃ підкладки з досліджуваною сумішшю. У випадку коли в якості підкладки було використано периклазовуглецевий вогнетрив суміш вапна і плавикового шпату у співвідношенні 3:1 (№5 табл. 4) і 1:1 (№6 табл. 4) при досягненні температури 1380°C зразки не розплавлялися.

З метою виключення взаємного впливу компонентів суміші вапна і плавикового шпату на температуру їх плавлення було підготовлено зразок (№7 табл. 4), який складався з двох окремих зразків – вапна, яке було розміщено зверху зразка та плавикового шпату, розміщеного під вапном у співвідношенні 1:1. Матеріали були спресовані таким чином, що вони мали чітку межу розділу. У результаті експерименту спостерігалось плавлення плавикового шпату в інтервалі температур 1250 – 1300°C, в процесі плавлення взаємодії розплаву плавикового шпату та вапна не спостерігалось. З підвищенням температури до 1350°C вапно не розплавлялося. Дані результати ставлять під сумнів загально прийняту точку зору, що плавиковий шпат сприяє процесу плавлення вапна.

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2019. - Вип.33

«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33

ISSN 2522-9117 «Fundamental'nye i prikladnye problemy černoј metallurgii». – 2019. – Vypusk 33

Таблиця 4 – Результати експериментальних досліджень

№ з/п	Склад ШОС	Маса зразка, г		Підкладка	Маса підкладки, г		Т, °С розм'якшення	Т, °С плавлення
		до експ.	після експ.		до експ.	після експ.		
1	Пегматит	-	-	Корунд	-	-	1158	1280
2	Вапно + пегматит (3:1)	-	-	Корунд	-	-	1335	1340
3	Вапно + плав. шпат (3:1)	-	-	Корунд	-	-	1348	1363
4	Плав. шпат	-	-	Вогнетрив*	-	-	1230	1280
5	Вапно + плав. шпат (3:1)	0,066	0,052	Вогнетрив*	0,73	0,726	1380°С зразок не розплавився	
6	Вапно + плав. шпат (1:1)	0,058	0,034	Вогнетрив*	0,726	0,738	1380°С зразок не розплавився	
7	Вапно + плав. шпат (1:1), зразок з межею розділу	0,07	0,022	Вогнетрив*	0,738	0,774	Плавлення плав. шпату при Т=1250-1300 °С. Т=1350 °С – вапно не розплавилось	
8	Плав. шпат	0,065	-	Вогнетрив*	0,774	0,832	1260	1280
9	Вапно + пегматит (3:1)	0,074	-	Вогнетрив*	0,832	0,904	1290	1340
10	Вапно + пегматит (4:1)	0,064	-	Корунд	-	-	1380°С зразок не розплавився	

Примітка: * – периклазовуглецевий вогнетрив.

При дослідженні плавлення суміші вапна з пегматитом у співвідношенні 3:1 (№2 і №9 табл. 4) спостерігалось плавлення суміші в інтервалі 1290 – 1340°С не залежно від виду підкладки. Натомість, при співвідношенні вапна до пегматиту як 4:1 (№10 табл. 4) плавлення не спостерігалось при 1380°С. Отже, у випадку суміші вапна з пегматитом у співвідношенні 3:1 пегматит суттєво впливає на процес плавлення суміші і стосовно процесу обробки сталі на УВП сприяє швидкому формуванню шлакового розплаву і як наслідок підвищує ефективність процесу масообмінних процесів в системі «метал-шлак».

При використанні у якості підкладки периклазовуглецевого вогнетриву в ході експериментів досліджуваних матеріалів та їх сумішей спостерігалось просочування матеріалів у глиб вогнетриву, у наслідок чого збільшувалась маса підкладки (див. табл. 4). Здатність вогнетриву поглинати шлакові розплави призводить до зміни його хімічного, мінералогічного та фазового складу. Тому в подальшому необхідно приділити особливу увагу дослідженню процесів взаємодії периклазовуглецевого вогнетриву з оксидними розплавами для підвищення його стійкості.

Висновки. З результатів виконаних досліджень слідує, що пегматит сприятливо впливає на процес розрідження вапна і формування шлакового розплаву і може використовуватися у якості компонента ШУС. Встановлено, що оптимальне співвідношення вапна до пегматиту становить 3:1. Використання пегматиту може повністю або частково замінити плавиковий шпат у складі шлакової суміші з вапном.

Перелік посилань

1. Основные свойства неорганических фторидов. Справочник. Под ред. Н.П. Галкина. // М: Атомиздат. – 1975. – 400 с.
2. Чуйко Н.М., Рутковский В.Б. Новая технология выплавки шарикоподшипниковой стали марки ШХ15 под белым шлаком // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 1960. – № 6. – С.14-16.
3. Чуйко Н.М., Чуйко А.Н. Теория и технология электроплавки стали. // Киев://Донецк: Головное издательство. – 1983 – 248 с.
4. Phase Diagram Study of the CaO–CaF₂ System / Dong-Geun KIM, Corrie van HOEK, Christian LIEBSKE, Sieger van der LAAN, Pierre HUDON and In-Ho JUNG // ISIJ International, Vol. 52 (2012), No. 11, pp. 1945–1950. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.52.1945>
5. Патент UA 122873 U, МПК (2017.01), C21C 7/00, C21C 7/076 (2016.01) Спосіб позапичної обробки сталі в ковші / А.И. Панченко, И.Н. Логозинский, А.С. Сальников, А.В. Яковицкий, С.Л. Касьян, М.И. Гасик, М.М. Гасик, А.П. Горобец, Ю.С. Пройдак, заявник ПАТ «Електрометалургійний завод «Дніпропецсталь» ім. А.М. Кузьміна». – № u2017 09009; заявл. 11.09.2017; опубл. 25.01.2018, Бюл. №2.
6. Корниевский В.Н. Разработка технологии внепечной обработки электростали с применением пегматита как заменителя плавикового шпата / В.Н. Корниевский, А.И. Панченко, И.Н. Логозинский, А.С. Сальников, С.Л. Касьян, П.А. Шибек, С.Л. Мазурук, А.В. Яковицкий, М.И. Гасик, А.П. Горобец // Современная электрометаллургия. – 2015. – №4. – С. 38-46. <https://doi.org/10.15407/sem2015.04.06>

References

1. *Osnovnie svoystva neorganicheskikh ftoridov [Basic properties of inorganic fluorides]*. (1975). Spravochnik. N.P. Galkin (Ed.). Moskva: Atomizdat, 1975, 400 p. (In Russian).
2. Chuyko N.M. & Rutkovskiy V.B. (1960). Novaya tehnologiya viplavki sharikopodshipnikovoy stali marki ShH15 pod belim shlakom [New technology for melting ball-bearing steel grade IIIX15 under white slag]. *Izvestiya visshih uchebnykh zavedeniy. Chernaya metallurgiya [Izvestiya. Ferrous metallurgy]*, 1960, 6, 14-16. (In Russian).
3. Chuyko N.M. & Chuyko A.N. (1983). *Teoriya i tehnologiya elektropлавки stali [Theory and technology of steel electric melting]*. Kiev-Donetsk: Golovnoe izdatelstvo, 1983, 248 p. (In Russian).
4. Dong-Geun Kim, Corrie van Hoek, Christian Liebske, Sieger van der Laan, Pierre Hudon & In-Ho Jung (2012). Phase Diagram Study of the CaO–CaF₂ System. *ISIJ International*, Vol. 52 (2012), 11, pp. 1945–1950. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.52.1945>
5. Panchenko A.I., Logozinskiy I.N., Salnikov A.S., Yakovitskiy A.V., Kasyan S.L. & Gasik M.I. et al. (2018). UA Patent No 122873, *Sposib pozapichnoyi obrobki stali v kovshi [Method of posed steel processing in ladles]*, PJSC «Electrometallurgical Works «Dniprospeetsstal» named after A.M. Kuzmin». (in Ukrainian).
6. Kornievskiy V.N., Panchenko A.I., Logozinskiy I.N., Salnikov A.S., Kasyan S.L. & Shibeko P.A. et al. (2015). Razrabotka tehnologii vnepechnoy obrabotki elektrostali s primeneniem pegmatita kak zamenitelya plavikovogo shpata [Development of a technology for out-of-furnace processing of electric steel using pegmatite as a substitute for fluorspar]. *Sovremennaya elektrometallurgiya [Electrometallurgy Today]*. 2015, 4, S. 38-46. (In Russian). <https://doi.org/10.15407/sem2015.04.06>

D.A. Stepanenko, PhD (Engin.), Senior Researcher, ORCID 0000-0002-0184-8295

A.S. Skachko, PhD (Engin.), Researcher

N.A. Tsyupa, PhD (Engin.), Senior Researcher

I.R. Snigura, Junior Researcher, ORCID 0000-0001-5872-7403

Institute named after Z.I. Nekrasov of the NAS of Ukraine

A.V. Yakovitsky, , Leading Engineer of the Steelmaking Laboratory, Dniprospeetsstal, PJSC Electrometallurgical Plant named after Kuzmina; ORCID 0000-0002-9540-303

Experimental studies of the melting points of CaF₂, pegmatite, and mixtures thereof with lime

Summary. Nowadays, one of the pressing issues is the problem of reducing material and energy costs in the production of certain types of products. Of particular importance are issues of slag formation due to the development of a ladle furnace (LF) plant for smelting special and alloyed steel grades with stringent requirements for the content of harmful impurities. Therefore, the question of choosing the rational composition of the slag-forming mixture (SFM) requires special attention. The aim of this work is to carry out research to solve the problems of improving the quality and competitiveness of manufactured metal products. The paper presents analytical and

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2019. - Вип.33

«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33

ISSN 2522-9117 *«Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii». – 2019. – Vypusk 33*

experimental studies of the phase composition and melting temperature of the CaF_2 - CaO system, which is the basis of the slag-forming mixture for refining steel in a ladle at domestic metallurgical enterprises. Previous studies on the replacement of fluorspar in the SFM with mineral raw materials of the domestic field showed that the alternative is the use of pegmatite from the Eliseevskoye field (Zaporizhzhya region). This contains alkali metal oxides Na_2O and K_2O , which affect both the decrease in slag viscosity of metallurgical production and the effect of desulfurization of the metal melt. Experimental studies of the melting points of fluorspar, pegmatite, and mixtures thereof with lime have been performed. Also, corundum and periclase-carbon refractory, which is usually used for lining the slag belt of LF buckets, were used as a substrate on which the process of melting of the studied materials and their mixtures took place. It is shown that pegmatite favorably affects the process of lime rarefaction and the formation of slag melt and can be used as a component of the SFM. The use of pegmatite can completely or partially replace fluorspar in the composition of the slag mixture with lime.

Keywords: slag-forming mixtures, pegmatite, lime, phase composition, melting points, slag melt, steel refining, corundum, periclase-carbon refractory, alkali metal oxides.

For citation: Stepanenko D.O., Yakovyts'kyi O.V., Skachko O.S., Tsyupa N.O., Snihura I.R. Eksperymental'ni doslidzhennya temperatur plavlennya CaF_2 , pehmatytu ta yikh sumishey z vapnom. [Experimental studies of melting temperatures of CaF_2 , pegmatite and their mixtures with lime.]. «Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii». [Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy] 2020, 34. 215-223. ((In Ukrainian). DOI 10.52150/2522-9117-2019-33-215-223

*Статья поступила в редакцию сборника 02.10.2019 года,
прошла внутреннее и внешнее рецензирование (Протокол заседания
редакционной коллегии сборника №2 от 23 декабря 2019 года)*

О.І. Бабаченко, д.т.н., с.н.с., директор, ORCID 0000-0003-4710-0343

Р.В. Подольський, інженер, ORCID 0000-0002-0288-0641

Г.А. Кононенко, к.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0001-7446-4105

О.А. Сафронова, інженер, ORCID 0000-0002-4032-4275

Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ СПОСОБІВ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ ЗАЛІЗНИЧНИХ РЕЙОК ТА ВИЗНАЧЕННЯМ ПОДАЛЬШИХ НАПРЯМКІВ ПІДВИЩЕННЯ ЇХ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ НАДІЙНОСТІ

Анотація. Виконано аналіз нормативно-технічної документації, встановлені характеристики, що впливають на зносостійкість залізничних рейок, розглянуті різні режими термічної обробки. Приведені результати заміру твердості гарячекатаної повнопрофільної рейки, зі сталі, яка класифікується як сталь марки К76Ф відповідно до нормативно-технічної документації. Показники твердості даної рейки відповідають класу міцності R260 або HT260 згідно EN 13674:1-2011 та ГОСТ Р 51685-2013 відповідно, тобто з нелегованої сталі без термічного зміцнення, що призначена для виробництва стрілочних переводів та метрополітену. На підставі порівняльного аналізу різних способів та режимів обробок залізничних рейок, встановлені подальші напрямки підвищення експлуатаційної надійності за допомогою відпрацювання способів нагріву, охолодження. Проведено дослідження мікроструктури дослідної сталі РСТ після пічного нагріву з охолодженням в різних охолоджуючих середовищах: спокійне повітря ($2^{\circ}\text{C}/\text{сек}$), вентилятор ($3,4^{\circ}\text{C}/\text{сек}$), компресор ($5,1^{\circ}\text{C}/\text{сек}$), вода при температурі 80°C ($75^{\circ}\text{C}/\text{сек}$). Встановлено, що при охолодженні зі швидкістю $5,1^{\circ}\text{C}/\text{с}$ отримаємо рівномірну структуру високодисперсного перліту з твердістю на рівні вимог закордонних стандартів. На підставі технічних джерел та фактичних даних встановлено, що об'ємний нагрів з наступним зануренням досліджуваних зразків зі сталі РСТ в середовище з контрольованою швидкістю охолодження $\approx 6,0^{\circ}\text{C}/\text{с}$ сприяє проходженню зони перетворення аустеніту в перліт $\alpha \rightarrow \gamma$ з отриманням структури перліту, а також досягненням твердості 415HB на глибині 20 мм. Показано, що використання пічного нагріву приводить до проходження повного дифузійного процесу, при якому проходить вирівнювання концентрації вуглецю та інших легуючих елементів по всьому об'єму досліджуваних зразків. Показані можливі напрямки підвищення механічних властивостей рейок для отримання рівномірної структури по всьому перетину головок рейки та отримання твердості, що регламентують зарубіжні стандарти.

Ключові слова: залізнична рейка, термічна обробка, швидкість охолодження, твердість, мікроструктура

Посилання для цитування: Бабаченко О.І., Подольський Р.В., Кононенко Г.А., Сафронова О.А. Порівняльний аналіз способів термічної обробки залізничних рейок та визначенням подальших напрямків підвищення їх експлуатаційної надійності. // «Фундаментальні та прикладні проблеми чорної

*«Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии». – 2019. - Вып.33
«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33 ISSN 2522-9117
«Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii». – 2019. – Vypusk 33*

Стан питання. Залізничні рейки є основним елементом залізничної колії, що працюють в складних умовах експлуатації: вони піддаються динамічним, циклічним та статичним навантаженням, а також високим контактним напруженням. Тому, на сьогоднішній день, для забезпечення безаварійної роботи залізничного транспорту до рейок пред'являються особливі вимоги [1, 2]. Насамперед залізничні рейки повинні добре чинити опір зносу, зародженню контактних дефектів та бути міцними, при наявності достатньої пластичності та в'язкості. В той же час, в них не повинні розвиватися крихкі тріщини [1].

Основним дефектом при нормальних умовах експлуатації рейок є їх знос. Зносостійкість в основному визначається рівнем твердості. Згідно вимог вітчизняної нормативно-технічної документації (ДСТУ 4344: 2004) твердість на глибині 11 мм від поверхні катання головки рейки повинна бути не менше 321 НВ. У той же час EN 13674-1:2011 має нормований показник твердості на глибині 20 мм (рис. 1, а): не менше 340НВ (для марки R370CrNT) і не менше 370 НВ (для марки R400NT); в ГОСТ Р 51685-2013 твердість регламентується на рівні не менше 352 НВ на глибині 22 мм (для марки ДТЗ70ІК) [2].

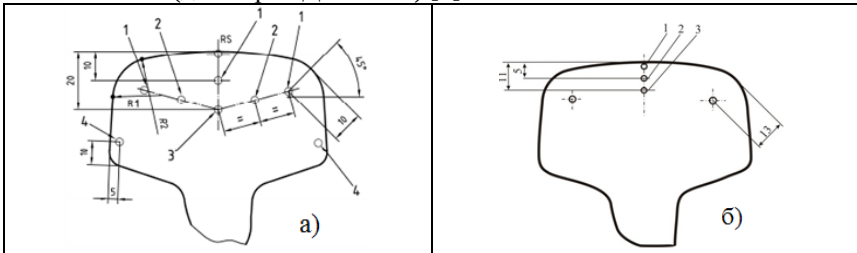


Рисунок 1 – Місця виміру твердості в рейці згідно EN 13674-1-2011 (а), згідно ДСТУ 4344: 2004 (б)

Для визначення відповідності рейок вітчизняного виробництва закордонним стандартам, був використаний повнопрофільний зразок рейки, виробництва «МК «Азовсталь», який по геометричним параметрам класифікований як рейка типу Р65. Ширина головки рейки 75 мм, висота головки по осі 45 мм. Хімічний склад рейкової сталі представлений в табл. 1. За масовою часткою елементів дана сталь може класифікуватися як сталь марки К76Ф.

Таблиця 1 – Хімічний склад досліджуваної рейкової сталі, мас. %

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Al	Ti	Mo	V
---	----	----	---	---	----	----	----	----	----	----	---

«Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии». – 2019. - Вип.33
 «Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33 ISSN 2522-9117
 «Fundamental'nye i prikladnye problemy černoј metallurgii». – 2019. – Vypusk 33

0,80	0,25	0,97	0,011	0,007	0,04	0,03	0,03	0,006	0,005	≤0,01	0,055
------	------	------	-------	-------	------	------	------	-------	-------	-------	-------

Для оцінки рівня твердості залізничних рейок українського виробництва в порівнянні з вимогами європейського стандарту на даний вид продукції, фактичну твердість по перетину головки рейки вимірювали по контрольним точкам, відповідно до вимог ДСТУ 4344:2004 (рис. 1, б). Результати вимірювань представлені в табл. 2.

Таблиця 2 – Результати вимірювання твердості по ДСТУ 4344: 2004 термічно зміцненої рейки

Місце визначення	Поверхня катання головки, середня частина довжини рейки, точка 1	У голівці на глибині 5 мм від поверхні катання по осі, точка 2	У голівці на глибині 11 мм від поверхні катання по осі, точка 3
Значення твердості, НВ	405	342	323

За рівнем твердості досліджувана рейка відповідає вимогам до вищої категорії по ДСТУ 4344:2004. При цьому дана категорія рейок за своїми показниками твердості на глибині 11 мм не відповідає мінімальним значенням для рейок зі сталі марки R350, яка забезпечує найменший рівень твердості для термозміцнення рейок по EN 13674-1:2011.

При цьому гарячекатана рейка вітчизняного виробництва відповідає класу міцності R260 (по EN 13674-1:2011) або НТ260 (по ГОСТ Р 51685-2011), тобто з нелегованої сталі без термічного зміцнення звичайної міцності загального призначення для метрополітену та виробництва стрілочних переводів. Таким чином, за рівнем твердості гарячекатана рейка близька до категорії нетермозміцнених рейок загального призначення для метрополітену та виробництва стрілочних переводів (по ГОСТ Р 51685-201 і EN 13674-1:2011).

Цей факт обумовив подальший напрямок досліджень, які полягали у аналітичних та лабораторних дослідженнях впливу способів та режимів термічної обробки на структуру та механічні властивості сталей для залізничних рейок.

Мета роботи: визначення перспективних способів і режимів термічної обробки залізничних рейок, що забезпечують механічні властивості на рівні кращих світових аналогів.

Результати досліджень. Як відомо, основним виробником залізничних рейок в Україні є МК «Азовсталь», що працює за технологією поверхневого гартування головки рейки з індукційного нагріву ТВЧ. Ця технологія відноситься до складного технологічного процесу, тому що

нагрівання та охолодження здійснюються при безперервно-послідовному русі рейок через рейкозагартувальну машину (РЗМ) в пружно-зігнутому стані і за короткий час [1]. Така технологія забезпечує досягнення механічних властивостей металу зміцненого шару головки рейки на рівні: $\sigma_b=1198-1370 \text{ Н/мм}^2$, $\sigma_{0,2}= 839-1080 \text{ Н/мм}^2$, $\delta_5= 8-16 \%$, $\Psi= 24-46 \%$, $KCU=26-36 \text{ Дж/см}^2$ [2], що відповідає вимогам ДСТУ 4344:2004. Але глибина зміцненого шару головки рейки складає 11-14 мм по центральній осі і 13-18 мм на її викружці, що свідчить про складність досягнення твердості на глибині 20-25 мм через особливості нагріву поверхневого та нижчих шарів металу під дією ТВЧ.

При індукційному нагріванні ТВЧ тепло генерується безпосередньо в металі головки рейки з боку поверхні катання. При цьому відбувається нагрівання металу в незначному обсязі, що дозволяє реалізувати нагрів з великою швидкістю ($8-10^0\text{C/c}$). Об'ємний нагрів рейок за рахунок зовнішнього джерела тепла відбувається із набагато меншою швидкістю (приблизно $0,3^0\text{C/c}$). Така швидкість призводить до наступних особливостей нагріву ТВЧ: наявність градієнта температур по глибині головки рейки в межах $100-120^0\text{C}$; зміщення критичної точки A_{c3} в область більш високої температури нагріву, що сприяє більш повному структурному перетворенню при більш високих температурах; відносно короткий час перебування металу головки рейки в області температур фазових перетворень, що сприяє гальмуванню збиральної рекристалізації наклепаних зерен аустеніту [1, 3].

В роботі [1, 3] показано, що при індукційному нагріванні ТВЧ поверхневий ефект характеризується глибиною проникнення тепла (δ), а максимальне значення характеризується «гарячою» глибиною проникнення струму ($\delta_{гор.}$). Для рейкової вуглецевої сталі стандартного складу $\delta_{гор.}$ досягає 11-12 мм. При цьому $\delta_{гор.}$ на глибину 11-12 мм забезпечується за рахунок індукованих струмів, а на більшу глибину головки - здійснюється, в основному, за рахунок теплопровідності.

За результатами досліджень [2, 4] встановлено, що теплопровідність, як правило, зменшується зі збільшенням ступеня легування сталі та числа легуючих елементів (кремній, марганець, особливо хром та нікель). З підвищенням вмісту вуглецю теплопровідність також знижується. Крім того, до деяких рейкових сталей входять два і більше легуючих елементів, сумарна дія їх сильніша, ніж в одного з них в той самій кількості. На рис. 2 представлена залежність коефіцієнта теплопровідності λ від температури для типових конструкційних матеріалів.

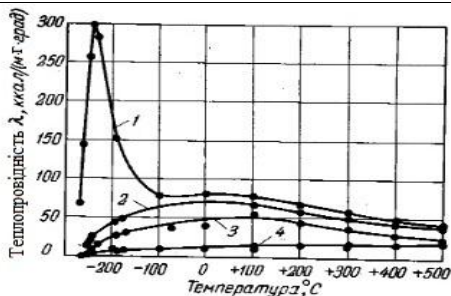


Рисунок 2 – Залежність теплопровідності заліза і деяких сталей від температури: 1-чисте залізо; 2-сталь (C=0,15%); 3-сталь (C=1,0%); 4-сталь аустенітна X18H9T, OX18H10. [3]

При індукційному прискореному нагріванні головки рейки ТВЧ структуроутворення має свої особливості, відмінні від пічного нагріву (зовнішнє джерело тепла), які полягають в природі фазових і структурних перетворень, що пов'язано зі збільшеною швидкістю нагріву і короткочасністю перебування металу в області фазових перетворень. При індукційному нагріві в головці рейки з вуглецевої сталі зі структурою грубопластинчатого перліту не встигають пройти до кінця дифузійні процеси, особливо при різній товщині цементних пластин, що не дозволяє в повній мірі отримати однорідний аустеніт при фазовому перетворенні ($\alpha \rightarrow \gamma$) по всьому об'єму нагрітого металу, особливо в мікролікваційних зонах з різним вмістом вуглецю. Це призводить до утворення мікроділянок з підвищеною або зниженою концентрацією даного компонента, а отже і зон з різною стійкістю аустеніту [1, 5].

Автори роботи [6, 7] зазначають, що в неоднорідному аустеніті є окремі зони з різним вмістом вуглецю. Для підтвердження даного факту в лабораторних умовах було проведено дослідження на зразках, вирізаних з головки рейки з вмістом вуглецю в сталі 0,75%. Частину зразків піддавали сфероїдизуючому відпалу при температурі 700-600°C, а частину залишили в початковому гарячекатаному стані.

Порівняльним мікроспектральним аналізом встановлено, що в зразках, які пройшли відпал, вміст вуглецю по всьому об'єму зразка був однорідним і відповідав плавковому складу, C=0,75%. У зразках, що не піддавалися сфероїдизуючому відпалу, в окремих ділянках металу був нерівномірний розподіл вуглецю в межах 0,66-0,88%. Це свідчить про те, що при відпалі пройшов дифузійний процес, при якому відбувається вирівнювання концентрації вуглецю по всьому об'єму зразків.

Технологічна проблематика термічного зміцнення залізничних рейок полягає не тільки в нагріванні, а також і в їх охолодженні.

Так, для об'ємно нагрітих в печі рейок поверхнєве охолодження неприйнятне. Це пов'язано з тим, що вони акумулюють значну кількість тепла в центрі головки рейки і для їх охолодження потрібні підвищені

швидкості, що призводить до формування в поверхневих шарах металу структури мартенситу, яка не відповідає вимогам ДСТУ 4344:2004 [1, 8]. При наступному пічному відпуску при температурі 450°C дана структура металу зазнає перетворення в сорбіт відпуску, але бейніт, що утворювався в перехідній зоні, залишається, що також не допускається вимогами ДСТУ 4344:2004. Тому при об'ємному нагріванні рейок для отримання структури сорбіту або трооститу гарту найбільш прийнятним є їх охолодження в мінеральному маслі [1,5,8], або за допомогою полімерних середовищ з контрольованими швидкостями охолодження. При даному способі відбір тепла від поверхні рейки відбувається по всьому його профілю.

Для металу рейок, нагрітих ТВЧ зі швидкістю 10⁰С/с, з урахуванням особливостей впливу на концентраційно-структурний стан перед початком прискореного охолодження досліджували вплив початкової температури інтервалі 740-930⁰С на кінетику фазових та структурних перетворень аустеніту [9, 10] при наступному охолодженні в воді. Хімічний склад сталі представлений у таблиці 3.

Таблиця 3 – Хімічний склад досліджуваної сталі

Умовне маркування	C, %	Mn, %	Si, %	V, %	P, %	S, %
РСТ	0,90	0,90	0,39	0,001	0,015	0,009

Металографічне дослідження сталі [1] показало, що в початковому стані структура представлена грубопластинчастим перлітом з чітко вираженими пластинами цементиту різної орієнтації (рис 3, а). При проведенні гартування від 740⁰С структура сталі складається з декількох складових (рис 3, б). Значна частина перліту зазнає перетворення. Перші зародки аустеніту виникають як на границях зерен, так і в перлітних колоніях. Формується суміш, що складається з цементних частинок, незначна кількість яких вже починає розчинятися, а також невеликих частинок безструктурного мартенситу (білі поля). Цей мартенсит формується в місцях, де в значній мірі відбулося перетворення перліту в аустеніт (рис. 3, б).

Після гартування від 760⁰С процес перетворення прискорюється і все більша частина перліту переходить в аустеніт, який в процесі охолодження також перетворюється в мартенсит (світлі ділянки). При цьому аустеніт поглинає перліт шляхом утворення уступів по поверхні розділу фаз. Структура сталі складається з невеликих ділянок мартенситу (рис 3, в) а зерна аустеніту неоднорідні за змістом вуглецю і марганцю. Марганець знаходиться в рейковій сталі, в основному, в складі цементиту (Fe, Mn)₃ C, розчинність якого в аустеніті з підвищенням температури нагріву під гартування збільшується.

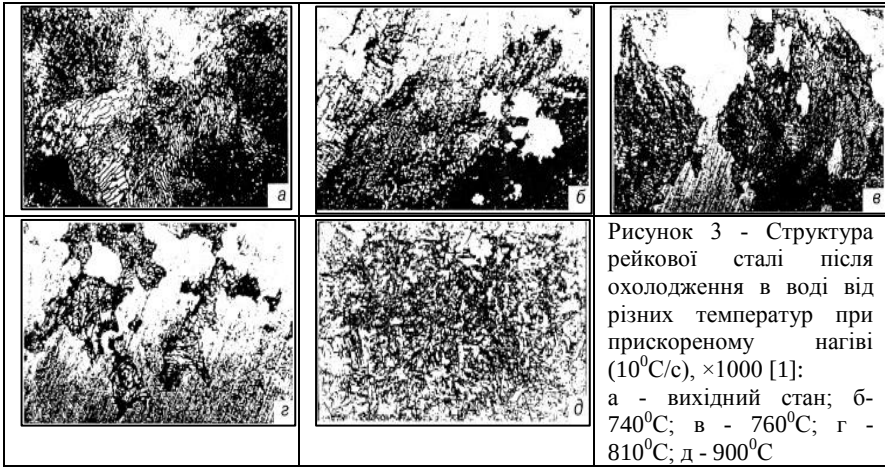


Рисунок 3 - Структура рейкової сталі після охолодження в воді від різних температур при прискореному нагріві (10^0C/c), $\times 1000$ [1]:
а - вихідний стан; б - 740^0C ; в - 760^0C ; г - 810^0C ; д - 900^0C

З підвищенням температури нагріву до 810^0C , ділянки аустеніту розростаючись, об'єднуються в більш великі і захоплюють значний простір поля шліфа (відбувається об'єднання розрізнених ділянок аустеніту). При цьому структура сталі є мартенситом, голки якого слабо витравлюються. Однак при даній температурі на фоні мартенситу спостерігаються окремі, дуже дрібні частинки нерозчиненого цементиту сферичної форми (рис. 3, г). При гартуванні сталі від 840^0C процес перетворення завершується і структура сталі складається з конгломерату різних фаз з явною перевагою мартенситної структури. Гартування від 900^0C призводить до утворення переважно мартенситної структури (рис. 3, д). При нагріванні сталі до 930^0C і охолодженні у воді утворюється середньоголчатий мартенсит 6 бала. Також було проведення дослідження мікроструктури при різних швидкостях охолодження при пічному нагріві за допомогою зовнішніх джерел нагріву в інтервалі температур $900 \pm 10^0\text{C}$ з наступним охолодженням в різних середовищах: повітря; вентилятор; компресор; вода при температурі 80^0C .

На рис. 4 показана мікроструктура вихідного стану перед проведенням термічної обробки (далі ТО), яка і в попередньому випадку, є чітко виражена структура, яка представлена з малою кількістю грубопластинчатого перліту (рис 4, б) та з пластинами цементиту різної орієнтації.

На рисунку 5 наведено графік термічної обробки сталі РСТ. Згідно графіку здійснюється нагрів вище лінії A_{c3} та витримка при температурі 900^0C з наступним охолодженням.

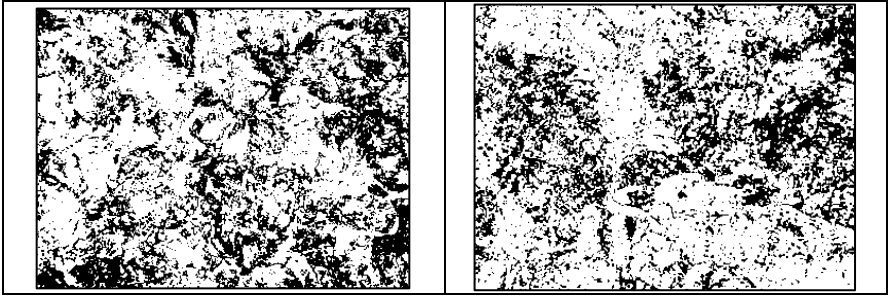


Рисунок 4 – Структура рейкової сталі РСТ в вихідному стані: а- $\times 100$, б- $\times 1000$.

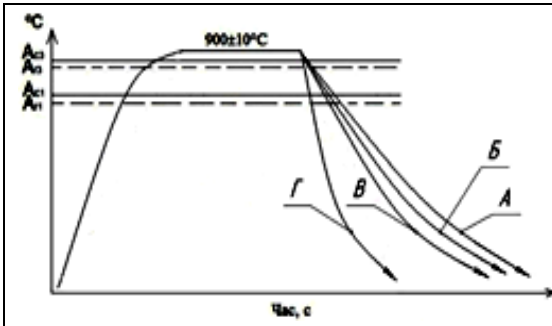


Рисунок 5 – Графік термічної обробки сталі РСТ з різними швидкостями охолодження: А - повітря ($2^{\circ}\text{C}/\text{c}$); Б - вентилятор ($3,4^{\circ}\text{C}/\text{c}$); В - компресор ($5,1^{\circ}\text{C}/\text{c}$); Г - вода при температурі 80°C ($75^{\circ}\text{C}/\text{c}$).

Нами було обрано декілька режимів охолодження з різними швидкостями та середовищами. Охолоджуючі середовища та швидкості охолодження, що використовувалися: на спокійному повітрі - $2^{\circ}\text{C}/\text{c}$ (рис. 5, а); за допомогою вентилятора - $3,4^{\circ}\text{C}/\text{c}$ (рис. 5, б); компресор - $5,1^{\circ}\text{C}/\text{c}$ (рис. 5, в); вода, з попереднім нагрівом до температури 80°C для отримання швидкості охолодження - $75^{\circ}\text{C}/\text{c}$ (рис. 5, г). Мікроструктуру зразків з РСТ виявляли за допомогою витравлювання мікрошліфів в ніталі - 4%-вому спиртовому розчині азотної кислоти.

При проведенні металографічного аналізу встановлено, що при проведенні гартування від $900\pm 10^{\circ}\text{C}$ структура сталі складається з декількох складових (рис 6). У більшості дослідних зразків переважає структура перліту (рис 6, а-в). Також при збільшенні швидкості охолодження формуються невеликі ділянки мартенситу (білі поля) (рис.6 б, в). У зразках, що охолоджувались з більшими швидкостями переважає структура мартенситу до повного перетворення на мартенсит (рис.6, г).

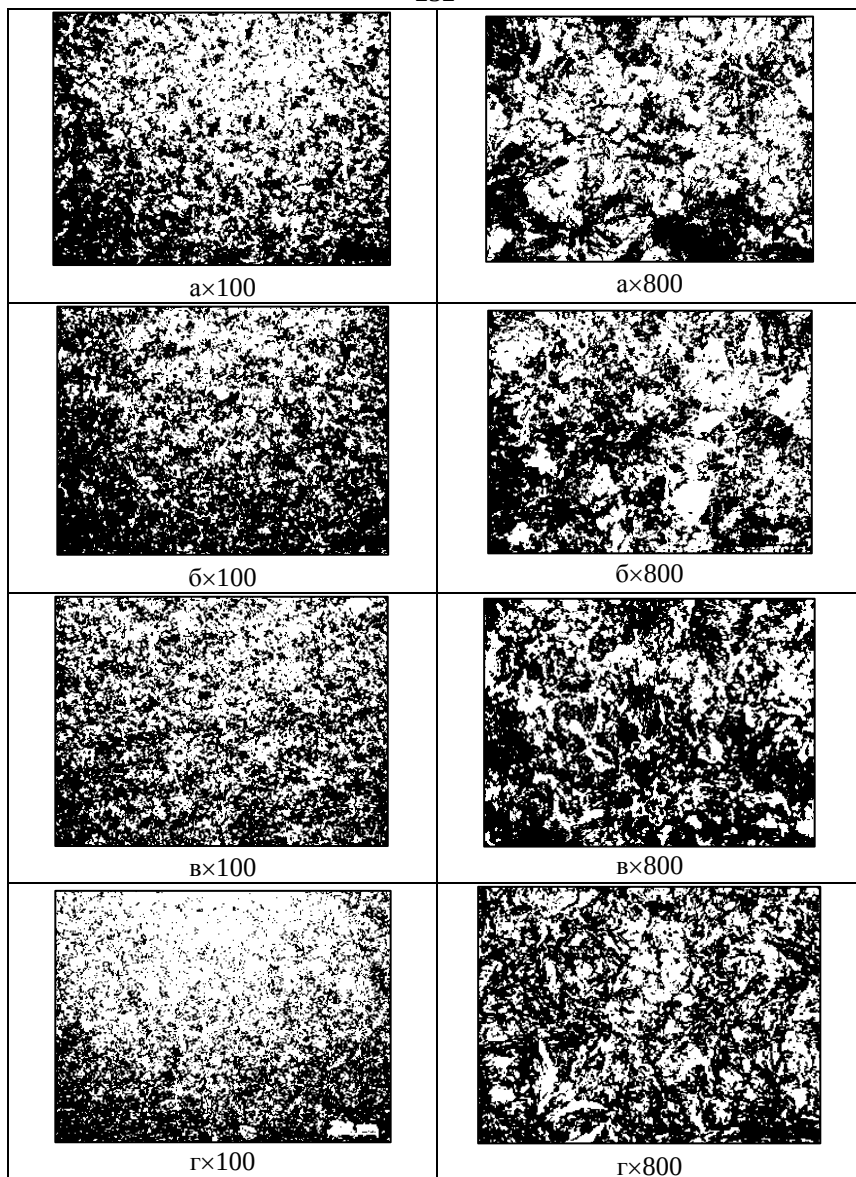


Рисунок 6 – Микроструктура досліджуваної сталі РСТ після термічної обробки: а - повітря ($2^{\circ}\text{C}/\text{c}$); б - вентилятор ($3,4^{\circ}\text{C}/\text{c}$); в - компресор ($5,1^{\circ}\text{C}/\text{c}$); г - вода при температурі 80°C ($75^{\circ}\text{C}/\text{c}$).

Було проведено вимірювання твердості за методом Бринелля згідно ГОСТ 9012. Результати вимірювань наведено в таблиці 4. При охолодженні зі швидкістю до $5,1^{\circ}\text{C}/\text{с}$ отримуємо рівномірну структуру високодисперсного перліту з твердістю, що відповідає вимогам закордонних стандартів. Встановлено, що при термічній обробці за чинною технологією (нагрів ТВС, охолодження з поверхні катання) досягнення твердості на глибині 20 мм є проблематичним. Перспективними напрямками зміни параметрів термічного зміцнення залізничних рейок, які дозволять отримати структуру перліту завдяки регламентованому проходженню зони перетворення аустеніту в перліт $\alpha \rightarrow \gamma$, і досягти твердості на рівні світових вимог в головці рейки на глибині 20 мм є використання об'ємного нагріву з наступним забезпеченням швидкості охолодження $\approx 6,0^{\circ}\text{C}/\text{с}$ в полімерних середовищах або підвищення рівномірності нагріву ТВЧ та диференційному охолодженні зі швидкістю $\approx 5^{\circ}\text{C}/\text{с}$.

Таблиця 4 – Результати вимірювання твердості за методом Бринелля досліджуваної сталі РСТ після термічної обробки.

Умове позначення сталі	Повітря, $2^{\circ}\text{C}/\text{с}$	Вентилятор, $3,4^{\circ}\text{C}/\text{с}$	Компресор, $5,1^{\circ}\text{C}/\text{с}$	Вода при 80°C , $75^{\circ}\text{C}/\text{с}$
РСТ	363 HB	398 HB	415 HB	651 HB

Висновки

1. Встановлено, що досягнення твердості на глибині 20-25 мм за чинною технологією є проблематичним через складності прогріву внутрішніх шарів металу під дією ТВЧ.

2. Показано, що при нагріві ТВЧ характерні такі особливості: градієнт температур по глибині головки рейки в межах $100-120^{\circ}\text{C}$; зміщення критичної точки A_{c3} в область більш високої температури нагріву, що сприяє повному перетворенню при більш високих температурах; відносно короткий час перебування металу головки рейки в області температур фазових перетворень, що сприяє гальмуванню збиральної рекристалізації наклепаних зерен аустеніту та збереженню концентраційної неоднорідності.

3. Встановлено, що використання пічного нагріву приводить до більш повного проходження дифузійних процесів, при якому проходить вирівнювання концентрації вуглецю та інших легуючих елементів по всьому об'єму зразків перед термічним зміцненням.

4. Проведені дослідження мікроструктури після термічної обробки сталі для залізничних рейок з використанням різних охолоджуючих середовищ. Встановлено, що при реалізації швидкості охолодження $\approx$

«Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии». – 2019. – Вып.33
 «Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33 ISSN 2522-9117
 «Fundamental'nye i prikladnye problemy černoј metallurgii». – 2019. – Vypusk 33

6,0⁰С/с в головці рейки на глибині 20 мм можливо отримати структуру високодисперсного перліту і досягти твердості на рівні світових вимог.

Перелік посилань

1. Качество термически упрочнённых рельсов и подкладок. Исследования. Теория. Оборудование. Технология. Эксплуатация.: Монография. / Т.С. Скобло, В.Е. Сапожков, Н.М. Александрова, А.И. Сидашенко. Под ред. проф. Т.С. Скобло – Х.: ТОВ «Щедра садиба плюс» 2014. – 577с.
2. Рожков И. В. Получение жидкого водорода / И. В. Рожков, О. А. Алмазов, А. А. Ильинский. – Москва: "Химия", 1967. – 199 с. – (Московская типография №21). – (УДК 661.96-404).
3. Скобло Т. С. Особенности технологии заковки железнодорожных рельсов с индукционного нагрева токами высокой частоты (ТВЧ) [Электронный ресурс] / Т. С. Скобло, В. Е. Сапожков – Режим доступа до ресурсу: http://www.rusnauka.com/9_KPSN_2011/Tecnic/8_83956.doc.htm.
4. Спектор О. Ш. Кислородно-флюсовая резка нержавеющей сталей / О. Ш. Спектор. – Москва: МАШГИЗ, 1962. – (Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы).
5. Технология термической обработки рельсов для работы в особо тяжелых условиях эксплуатации/ Д.К. Нестеров, В.Е. Сапожков, Н.Ф. Левченко и др. // Сталь, 1989, № 7, С. 79-82.
6. Кидин И.Н. Физические основы электротермической обработки металлов и сплавов. / И.Н. Кидин. - М.: Металлургия, 1969. - 375 с.
7. Сферидизация карбидной фазы в заэвтектоидной стали и её влияние на свойства рельсов / Д.В. Сталинский, А.С. Рудюк, В.Е. Сапожков и др.// Металлургическая и горнорудная промышленность, Днепропетровск, 2007, № 2, С. 48-54.
8. Разработка и промышленное использование режима нагрева ТВЧ для термообработки рельсов из заэвтектоидной стали/ Д.К. Нестеров, Н.Ф. Левченко, В.Е. Сапожков и др.// МиТом, 1991, № 11, С. 6-8.
9. Сталинский Д.В. Мировой опыт термоупрочнения рельсов с прокатного нагрева или с использованием части тепла / Д.В Сталинский., Д.К. Нестеров, В.Е. Сапожков // Металлургическая и горнорудная промышленность.- Днепропетровск, 2006. - № 5. - С. 59-63.
10. Дегтярев С.И. Исследование и разработка технологии поверхностной индукционной заковки железнодорожных рельсов из низколегированной стали / С.И. Дегтярев, Т.С. Скобло, В.Е. Сапожков // МиТОМ. - 1998, № 12. - С. 7-10.
11. Рельсы железнодорожные. Общие технические условия (EN 13674-1:2011, NEQ): ГОСТ Р 51685–2013. -[Дата введения 2014-07-01]. - М.: Стандартиформ, 2014. - 96 с. - (Национальный стандарт Российской Федерации).
12. Совершенствование промышленной технологии термической обработки рельсов с нагрева ТВЧ / Д.К. Нестеров, В.Е. Сапожков, Н.Ф.Левченко и др. //

Сб. науч. тр.: «Технология производства железнодорожных рельсов и колес». - Харьков: УкрНИИМЕТ, 1996. - С. 61-70.

Reference

1. Skoblo T.S., Sapozhkov V.Ye., Aleksandrova N.M. & Sidashenko A.I. (2014). *Kachestvo termicheski uprochnonnykh rel'sov i podkladok. Issledovaniya. Teoriya. Oborudovaniye. Tekhnologiya. Eksploatatsiya.: Monografiya [The quality of thermally hardened rails and linings. Research. Theory. Equipment. Technology. Operation. Monograph.]*. T.S. Skoblo (Ed.), Kharkiv: TOV «Shchedra sadiba plus», 2014, 577p. (In Russian).
2. Rozhkov I.V., Almazov O.A. & Il'inskiy A.A. (1967). *Polucheniye zhidkogo vodoroda [Obtaining liquid hydrogen]*. Moskva: "Khimiya", 1967, 199p. (In Russian).
3. Skoblo T.S. & Sapozhkov V.Ye. (2011). Osobennosti tekhnologii zakalki zheleznodorozhnykh rel'sov s induktsionnogo nagreva tokami vysokoy chastoty (TVCH) [Features of the technology of hardening of railway rails with induction heating by high-frequency currents (HFC)]. Available at: http://www.rusnauka.com/9_KPSN_2011/Tecnic/8_83956.doc.htm. (In Russian).
4. Spektor O.SH. (1962). *Kislородно-flyusovaya rezka nerzhaveyushchikh staley [Oxygen-flux cutting of stainless steels]*. Moskva: MASHGIZ, 1962. (In Russian).
5. Nesterov D.K., Sapozhkov V.Ye. & Levchenko N.F. et al. (1989). Tekhnologiya termicheskoy obrabotki rel'sov dlya raboty v osobo tyazhelykh usloviyakh ekspluatatsii [Technology of heat treatment of rails for work in especially difficult operating conditions]. *Stal' [Steel]*, 1989, 7, 79-82. (In Russian).
6. Kidin I.N. (1969). *Fizicheskiye osnovy elektrotermicheskoy obrabotki metallov i splavov [Physical foundations of electrothermal treatment of metals and alloys]*. Moskva: Metallurgiya, 1969, 375 p. (In Russian).
7. Stalinskiy D.V., Rudyuk A.S. & Sapozhkov V.Ye. et al. (2007). Sferidizatsiya karbidnoy fazy v zaevtektoidnoy stali i yeyo vliyaniye na svoystva rel'sov [Spheridization of the carbide phase in hypereutectoid steel and its influence on the properties of rails]. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost' [Metallurgical and mining industry]*, Dnepropetrovsk, 2007, 2, 48-54. (In Russian).
8. Nesterov D.K., Levchenko N.F. & Sapozhkov V.Ye. et al. (1991). Razrabotka i promyshlennoye ispol'zovaniye rezhima nagreva TVCH dlya termoobrabotki rel'sov iz zaevtektoidnoy stali [Development and industrial use of the high-frequency current heating mode for heat treatment of rails from hypereutectoid steel]. *MiTOM [Metal Science and Heat Treatment]*, 1991, 11, 6-8. (In Russian).
9. Stalinskiy D.V., Nesterov D.K. & Sapozhkov V.Ye. (2006). Mirovoy opyt termouprochneniya rel'sov s prokatnogo nagreva ili s ispol'zovaniyem chasti tepla [World experience of thermo-hardening of rails from rolling heating or using part of the heat]. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost' [Metallurgical and mining industry]*. Dnepropetrovsk, 2006, 5, 59-63. (In Russian).
10. Degtyarev S.I., Skoblo T.S. & Sapozhkov V.Ye. (1998). Issledovaniye i razrabotka tekhnologii poverkhnostnoy induktsionnoy zakalki zheleznodorozhnykh rel'sov iz

«Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии». – 2019. - Вып.33
 «Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33 ISSN 2522-9117
 «Fundamental'nye i prikladnye problemy černoј metallurgii». – 2019. – Vypusk 33

- nizkolegirovannoy stal [Research and development of technology for surface induction hardening of low-alloy steel railroad rails]. *MiTOM [Metal Science and Heat Treatment]*, 1998, 12, 7-10. (In Russian).
11. Rel'sy zheleznodorozhnyye. Obshchiye tekhnicheskiye usloviya [Railroad rails. General specifications], GOST R 51685–2013 (EN 13674-1:2011, NEQ), 2013, 96p. (In Russian).
 12. Nesterov D.K., Sapozhkov V.Ye. & Levchenko N.F. et al. (1996). Sovershenstvovaniye promyshlennoy tekhnologii termicheskoy obrabotki rel'sov s nagreva TVCH [Improvement of industrial technology of heat treatment of rails with heating of high frequency current]. Sb. nauch. tr.: *Tekhnologiya proizvodstva zheleznodorozhnykh rel'sov i koles [Production technology of railway rails and wheels]*. Khar'kov: UkrNIIMET, 1996, 61-70. (In Russian).

A.I. Babachenko, Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher, Director, ORCID 0000-0003-4710-0343

R.V. Podolskiy, engineer, ORCID 0000-0002-0288-0641

G.A. Kononenko, Ph.D., Senior Researcher, ORCID 0000-0001-7446-4105

E.A. Safronova, engineer, ORCID 0000-0002-4032-4275

Iron and Steel Institute named after Z.I. Nekrasov of the NAS of Ukraine

Comparative analysis of methods of heat treatment of railway rails and determination of further directions of increasing their operational reliability

Summary. The analysis of normative and technical documentation is carried out, the characteristics influencing on wear resistance of railway rails are established, various modes of thermal treatment are considered. The results of measuring the hardness of the hot-rolled full-profile rail, made of steel, which is classified as steel of the K76F brand in accordance with the regulatory and technical documentation are given. The hardness of this rail corresponds to the strength class R260 or NT260 according to EN 13674: 1-2011 and GOST R 51685-2013 respectively, that is, from unalloyed steel without thermal hardening, intended for the production of turnouts and underground. On the basis of comparative analysis of various ways and modes of railway rail handling, further directions of increasing operational reliability are established by means of working out methods of heating, cooling. The microstructure of the experimental steel of the PCT after the furnace heating with cooling in various cooling media was studied: Calm air (2°C/s), fan (3.4°C/s), compressor (5.1°C/s), water at a temperature of 80°C (75°C/s). It is established that at cooling rate 5.1°C/s we obtain an even structure of highly dispersed perlite with hardness at the level of requirements of foreign standards. On the basis of technical sources and actual data it is established that volumetric heating with subsequent immersion of investigated samples from the steel of the PCT into an environment with a controlled cooling rate of $\approx 6.0^{\circ}\text{C/s}$ contributes to the passage of the zone of transformation of austenite into perlite $\alpha \rightarrow \gamma$ with the reception of the structure of the perlite, as well as reaching a hardness of 415HB at a depth of 20 mm. It is shown that the use of furnace heating leads to the complete diffusion process, in which the concentration of carbon and other alloying elements is equalized throughout the volume of samples studied. The possible directions of increasing the mechanical properties of

rails to obtain an even structure along the entire section of the rail head and to obtain hardness, which is regulated by foreign standards, are shown.

Keywords: railway rail, heat treatment, cooling rate, hardness, microstructure

For citation: Babachenko O.I., Podol's'kyi R.V., Kononenko H.A. , Safronova O.A. Porivnyal'nyy analiz sposobiv termichnoyi obrobky zaliznychnykh reyok ta vyznachenniam podal'shykh napryamkiv pidvyshchennya yikh ekspluatatsiynoyi nadiynosti. [Comparative analysis of methods of heat treatment of railway rails and determination of further directions of increasing their operational reliability.]. «Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii». [Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy] 2020, 34. 224-237. (In Ukrainian). DOI 10.52150/2522-9117-2019-33-224-237

*Статья поступила в редакцию сборника 19.10.2019 года,
прошла внутреннее и внешнее рецензирование (Протокол заседания
редакционной коллегии сборника № 20т 23 декабря 2019 года)*

О.Н. Перков, к.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0002-8101-4054

И.А. Вакуленко, д.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0002-7353-1916

В.М. Кузьмичев, зав. отделом, ORCID 0000-0003-2057-3001

Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины

ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА (ТЦО) МЕТАЛЛОВ – ПУТЬ К ПОЛУЧЕНИЮ ОПТИМАЛЬНЫХ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ

Аннотация. Целью настоящей работы является изучение возможности использования термической циклической обработки (ТЦО) металлов для получения структур, определяющих оптимальный комплекс механических свойств. Приведены основные положения ТЦО металлов с использованием периодически повторяющихся циклов нагрева и охлаждения. Метод ТЦО, как способ термообработки, основан на постоянном накоплении от цикла к циклу положительных изменений в структуре металлов. Исследования показали, что при быстром нагреве рост аустенитного зерна происходит медленно и поэтому нагрев до высоких температур (до 1000⁰С) не ведет к интенсивному увеличению зерна. Установлено, что увеличение размеров зерен идет при переменной температуре нагрева в 3 раза медленнее, чем в изотермических условиях при соответствующей температуре. При условии, когда скорость роста новой фазы (аустенита) мала, а скорость зарождения зерен значительна, получается, что к концу $\alpha \rightarrow \gamma$ превращения сохраняется сверхмелкозернистая структура. Дальнейший нагрев или выдержка при постоянной температуре приводит к быстрому укрупнению зерен аустенита. Если произвести охлаждение (например, на воздухе) быстро нагретой стали на 10–15⁰С выше температуры точки A_{c1} , то вследствие обратной перекристаллизации образуется мелкое зерно перлита. При одном термоцикле феррит в доэвтектоидных сталях почти не претерпевает изменений. Но если произвести несколько таких нагревов и охлаждений, то вся ферритно-перлитная структура претерпевает изменение. Установлено, что чем больше скорость нагрева при ТЦО и меньше перегревы над точкой A_{c1} , тем мельче зерно в углеродистой конструкционной стали. Однако при этом возрастает необходимость увеличивать число циклов термообработки. Приведен механизм структурообразования, объясняющий эти явления, и практические рекомендации по реализации процесса ТЦО. Такой подход дает возможность сформировать оптимальную структуру металла. При этом могут быть существенно расширены возможности в части получения материалов с заданными свойствами и совершенствование на этой основе машин, конструкций, отдельных узлов и деталей. Все это ставит ТЦО в разряд перспективных направлений в металлообработке.

Ключевые слова: термическая циклическая обработка, сталь, структурные превращения, аустенит, перлит, феррит

Ссылка для цитирования: Перков О.Н., Вакуленко И.А., Кузьмичев В.М. Термоциклическая обработка (ТЦО) металлов – путь к получению оптимальных структуры и свойств. // «Фундаментальні та прикладні проблеми

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2019. – Вип.33

«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33

ISSN 2522-9117 *«Fundamentalnye i prikladnye problemy černoj metallurgii»*. – 2019. – Vypusk 33

Физико-химические основы ТЦО

Состояние вопроса. Метод термической обработки металлов (ТЦО) как способ термообработки (ТО) основан на постоянном накоплении от цикла к циклу обработки положительных изменений в структуре металлов. При этом важной особенностью цикла является его интенсивность, отсутствие или наличие небольших выдержек при крайних температурах, а также оптимальный диапазон изменения температуры.

Современное оборудование позволяет вести процесс со скоростью нагрева от десятых долей градуса в секунду (печной нагрев) до сотен (нагрев с помощью ТВЧ). Температурный диапазон зависит от назначения термического воздействия, физико-механических и теплофизических свойств материала, а также от его структурного состояния. С другой стороны, варьируя число циклов, которое является величиной в значительной степени ограниченной, так как речь идет о технологическом термоциклировании, возможно получение принципиально различных структур, а следовательно и свойств. Немаловажное значение имеет и обработка, следующая за ТЦО, такая, как отжиг, искусственное старение и др. Поэтому очень важно при выборе окончательной операции не только сохранить те положительные изменения, которые произошли в результате ТЦО, но также и усилить их.

В отличие от стандартных методов ТО, при ТЦО появляются дополнительные источники воздействия на структуру, свойственные только процессу прерывного изменения температуры, основными из которых являются фазовые превращения, градиенты температуры, термические (объемные) и межфазные напряжения, обусловленные разницей теплофизических характеристик, составляющих структуру фаз.

В зависимости от вида перемещения атомов через межфазную границу и степени развития диффузионных процессов превращения бывают массивными, мартенситными, когерентными и нормальными.

Массивные превращения характеризуются нормальными (индивидуальными) переходами атомов без перераспределения компонентов между фазами. Образуется фаза того же состава, что и исходная.

При *мартенситных* превращениях атомы перемещаются кооперативно (по сдвиговому механизму) на расстояния, не превышающие межатомные. Превращение происходит при сильном переохлаждении. При этом индивидуальные переходы атомов через межфазную границу затруднены. Образующаяся в этих условиях фаза имеет состав, аналогичный исходной, однако она находится в

кристаллогеометрической связи с ней.

Перестройка решетки происходит путем перемещения частичных дислокаций. В связи с изменением формы превращающейся области, происходит релаксация упругих напряжений, следствием чего является образование дефектов кристаллического строения в мартенситной и исходной фазах.

Когерентные (видманштеттовые) превращения осуществляются по сдвигово-диффузионному механизму с образованием фазы, отличающейся по составу, и изменением формы превращенного объема.

Нормальные (некогерентные) превращения протекают при значительно меньших переохлаждениях путем индивидуальных переходов атомов с образованием фазы, отличной по составу от исходной.

На окончательную структуру влияют фазовые переходы, не связанные с существенными изменениями фазового состава. Речь идет о сфероидизации фаз и коалесценции. При этом движущими силами могут быть разница в удельной энергии межфазных границ, а кроме того, разница в свободной энергии более мелких и более крупных частиц (энергия Гиббса). Таким образом, все фазовые переходы сопряжены со стремлением системы к энергетически более выгодному состоянию. При этом процесс диффузии атомов в зависимости от природы материала и физико-химических свойств может идти по одному из рассмотренных выше механизмов.

Цель настоящей работы: получение структур, обеспечивающих оптимальный комплекс механических свойств стали.

Термоциклическая обработка основана на многократном прохождении структурных превращений. Так, если при обычных видах ТО, включающих изотермические выдержки, структура характеризуется начальным и конечным состояниями, то при ТЦО структура перед каждым новым циклом разная, что влияет на условия прохождения последующих фазовых превращений, их механизм и кинетику. При этом за счет накопления структурных изменений материал может приобретать структуру, которая недостижима при обычных видах ТО.

Рассмотрим более подробно процессы, происходящие при ТЦО. Фазовые и структурные превращения сопровождаются образованием, перемещением и аннигиляцией точечных и линейных дефектов, а также перераспределением легирующих элементов. Интенсивность процессов зависит от многих технологических факторов, в том числе от температурного интервала, скоростей нагрева и охлаждения, числа превращений и т.д. В результате многократной аустенитизации, из-за разницы удельных объемов превращенных фаз, в металле протекают процессы, свойственные нагреву слабдеформированных металлов, а именно: диффузия точечных дефектов и их сток в дислокации и границы с попутной частичной их аннигиляцией; перераспределение дислокаций;

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2019. – Вип.33

«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33

ISSN 2522-9117 *«Fundamentalnye i prikladnye problemy černoj metallurgii». – 2019. – Vypusk 33*

формирование малоугловых границ; миграция малоугловых границ с поглощением дефектов; миграция межзёренных границ между рекристаллизованными зёрнами и укрупнение последних при одновременном снижении зернограницной и поверхностной энергий [1].

При ТЦО не все процессы, свойственные нагреву слабо деформированных металлов, протекают одновременно, а именно в силу непрерывности изменения температуры могут идти одни, тормозиться другие и развиваться третьи. Если структурные составляющие материала деформированы не сильно, как это имеет место при ТЦО, то в полувосстановленном состоянии возможно протекание первичной рекристаллизации, а при меньших температурах – и полигонизации. Центры рекристаллизации образуются в первую очередь в тех участках решетки, которые наиболее искажены, в том числе у границ зёрен и их стыков. Это ведет к формированию мелкозернистой структуры. Процесс рекристаллизации при ТЦО можно представить как чередование малых деформаций при кристаллизационных отжигах.

Известно [2], что при заданной температуре старения скорость зарождения выделений определяется работой образования критического зародыша $\Delta F_{кр}$. Первыми появляются зародыши с минимальной $\Delta F_{кр}$, а затем – зародыши с большей ее величиной. При температуре T_1 (рис. 1.) последовательность образования выделений такова: сначала образуются зоны Гинье–Престона (ЗГП), затем по истечении времени $\tau_{\beta'}$ – промежуточная β' -фаза, а после выдержки τ_{β} – стабильная β -фаза.

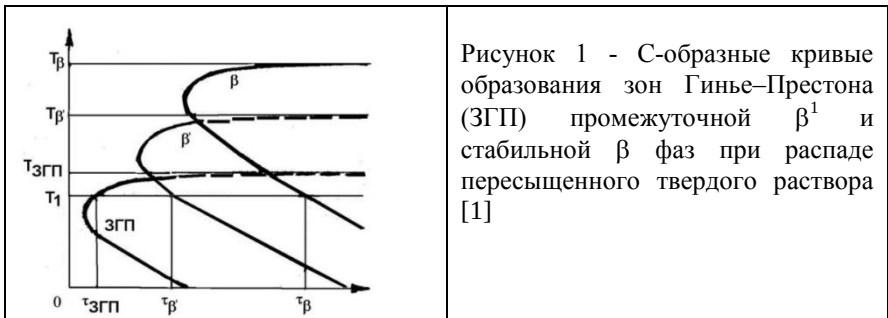


Рисунок 1 - С-образные кривые образования зон Гинье–Престона (ЗГП) промежуточной β' и стабильной β фаз при распаде пересыщенного твердого раствора [1]

Известно [2], что при заданной температуре старения скорость зарождения выделений определяется работой образования критического зародыша $\Delta F_{кр}$. Первыми появляются зародыши с минимальной $\Delta F_{кр}$, а затем – зародыши с большей ее величиной. При температуре T_1 (рис. 1.) последовательность образования выделений такова: сначала образуются зоны Гинье–Престона (ЗГП), затем по истечении времени $\tau_{\beta'}$ – промежуточная β' -фаза, а после выдержки τ_{β} – стабильная β -фаза.

Для большинства сплавов максимальное упрочнение создается, когда в структуре отсутствуют некогерентные выделения. Существуют несколько возможных варианта образования более стабильных выделений, а именно: прямое превращение менее устойчивых в более стабильные, а также независимое зарождение и рост стабильных фаз. При этом образование более стабильных фаз сопровождается одновременным растворением менее устойчивых.

Так как упрочнение достигается за счет торможения дислокаций продуктами распада, в том числе полями упругих напряжений в матрице вокруг выделений при перерезании или огибании выделений дислокациями, то с точки зрения получения наибольшего упрочнения предпочтительно образование ЗГП и промежуточных фаз. Выделения стабильных фаз некогерентны матрице, не имеют полей упругих напряжений, а расстояния между ними сравнительно велики. Это делает возможным значительно более легкое огибание таких препятствий дислокациями.

В основе ТЦО, так же, как и при «динамическом» старении, лежат процессы, связанные с возникновением и релаксацией напряжений, накоплением дефектов кристаллического строения, развитием субструктуры, что эффективно влияет на распад твердого раствора. При этом в отличие от искусственного старения, где распад твердого раствора определяется только температурно-временными параметрами, при ТЦО возможно перераспределение продуктов распада регулированием скоростями нагрева и охлаждения в циклах, интервалом ТЦО, а также числом циклов. Решающее влияние на процесс распада, очевидно, будет оказывать объемная упругая энергия взаимодействия между создаваемым в процессе ТЦО полем напряжений и полем напряжений, образующимся вследствие выделения упрочняющих фаз, как результат несоответствия кристаллических решеток и модулей упругости матрицы и фазы. При этом возможно достижение состояния структуры, при котором в ней будут присутствовать только предвыделения и метастабильные фазы.

Характерные для ТЦО структурные изменения могут быть усилены путем пластической деформации. Как известно, пластическая деформация перераспределяет и повышает плотность несовершенств кристаллического строения – дислокаций, вакансий, дефектов упаковки, а кроме того, способствует образованию и развитию мало- и высокоугловых границ. Так как дефекты кристаллической решетки сильно влияют на формирование структуры сплавов при фазовых и структурных переходах, пластическую деформацию перед ними, а также в период их прохождения можно эффективно использовать для создания оптимальной структуры при ТЦО сталей и сплавов. Процессы пластического деформирования и ТЦО можно совмещать, но можно проводить и независимо друг от друга. При этом важно, чтобы фазовые и

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2019. - Вип.33

«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy»». – 2019. – Collection 33

ISSN 2522-9117 *«Fundamentalnye i prikladnye problemy černoj metallurgii»». – 2019. – Vypusk 33*

структурные превращения проходили в новых, измененных условиях, характеризующихся повышенной плотностью дефектов, создаваемых пластической деформацией. Так, в опытах с предварительной холодной деформацией ТЦО возрастает число центров образующейся γ -фазы и, как следствие, интенсивно измельчается зерно аустенита. Кроме того, при деформировании в межкритическом интервале температур в результате динамического $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения можно значительно ускорить процесс перекристаллизации, сильно наклепать составляющие структуры и измельчить зерно.

Таким образом, использование пластической деформации может быть эффективно при ТЦО, проводимой в области перлитных, бейнитных и мартенситных превращений, а также при старении и циклировании в области температур переменной растворимости химических элементов в твердом растворе [3].

Изложение концепции исследований.

Изменения в структуре сталей и сплавов после быстрых нагревов и охлаждений вызваны двумя причинами. Одна из них не связана с фазовыми превращениями, а другая обусловлена особенностями фазовых переходов в условиях быстроменяющейся температуры. До и после ТО поликристаллический материал представляет собой набор различных по концентрации участков, поэтому в работе применили статистический анализ распределения химических элементов. Из полученных данных концентраций твердого раствора строили гистограммы распределения, определяли среднее значение концентрации химического элемента в твердом растворе, дисперсию среднего значения концентрации, характеризующую структурную однородность материала, а также коэффициент асимметрии, по которому судили о характере распределения.

Исследования показали, что при быстром нагреве рост аустенитного зерна происходит медленно и поэтому нагрев до высоких температур (до 1000°C) не ведет к интенсивному увеличению зерна. Критическая температура A_{c1} при ускорении нагрева возрастает и «размывается» так, что появляется необходимость фиксировать и впоследствии учитывать значения температуры начала $\alpha \rightarrow \gamma$ -превращения A_{c1u} и температуру конца $\alpha \rightarrow \gamma$ -превращения A_{c1k} в процессе структурного превращения перлита в аустенит. Первоначально в нагреваемом сплаве при температуре A_{c1u} появляются первые, очень мелкие зерна аустенита в перлите. Аустенит зарождается на границах между пластинками цементита и феррита. Число зарождающихся зерен аустенита в объеме превращающегося перлита чрезвычайно велико. При дальнейшем нагреве наблюдается некоторое увеличение числа зерен аустенита, возникающих в основном вблизи дефектов в феррите. Установлено, что увеличение

размеров зерен идет при переменной температуре нагрева в 3 раза медленнее, чем в изотермических условиях при соответствующей температуре. При условии, когда скорость роста новой фазы (аустенита) мала, а скорость зарождения зерен значительна, получается, что не только в момент, но и к концу $\alpha \rightarrow \gamma$ -превращения сохраняется сверхмелкозернистая структура. Дальнейший нагрев или выдержка при постоянной температуре приводит к быстрому укрупнению зерен аустенита.

Если произвести охлаждение (например, на воздухе) быстро нагретой стали на 10–15°C выше температуры точки A_{c1} , то вследствие обратной перекристаллизации образуется мелкое зерно перлита. При одном термоцикле феррит в доэвтектоидных сталях почти не претерпевает изменений. Но если произвести несколько таких нагревов и охлаждений, то вся ферритно-перлитная структура претерпевает изменение.

Тот факт, что в результате ТЦО резко измельчаются зерна в сталях и чугунах, требует своего объяснения. Наибольшую сложность вызывает понимание этого процесса в сталях с феррито-перлитной структурой. При попытках объяснить получение термоциклированием равномерной мелкозернистой структуры в доэвтектоидных углеродистых сталях необходимо исходить из механизма образования аустенита при ускоренных нагревах и его распада при последующих охлаждениях.

Большие сложности вызывает объяснение начальной стадии превращения перлита и части доэвтектоидного феррита при температуре, близкой к 750°C (A_{c1}), хотя температура фазового превращения α -железа в γ -железо при отсутствии цементита составляет 910°C. Известно, что первые зародыши аустенита при нагреве до точки A_{c1} образуются на межфазных границах феррита с цементитом. Установлено также, что превращение перлита в аустенит идет по мере «растворения» цементита и насыщения углеродом до 0,8% зон, прилегающих вначале к цементиту, а потом к новой фазе – аустениту. По мере насыщения новой фазы углеродом – до 0,8% и более, идет дальнейшее превращение феррита в аустенит. Этот диффузионный механизм превращения перлита (цементита + феррита) в аустенит хорошо изучен и не вызывает сомнений, если скорость нагрева меньше 1°C/мин. При малой скорости нагрева дефекты кристаллического строения исходных структур исчезают еще до начала превращения.

Бездиффузионное $\alpha \rightarrow \gamma$ -превращение обусловлено двумя факторами.

1. Немаловажное значение для появления бездиффузионного механизма превращения части феррита в аустенит после точки A_{c1} перлитно-аустенитного превращения имеют дефекты, искажения кристаллического строения феррита в его приграничных зонах. Эти дефекты и межфазные напряжения возникают при неполном структурном

превращении, т. е. тогда, когда перлит претерпевает превращение, а феррит запаздывает с превращением. В этом случае ослабевают внутрикристаллические силы взаимодействия атомов в поверхностных слоях контактирующих фаз. Однако известно, что при нагреве исчезающая фаза (феррит) теряет устойчивость, энергию взаимодействия атомов, а новая (аустенит) – увеличивает свою внутреннюю энергию.

2. При взаимодействии с аустенитом кристаллическая решетка феррита, будучи неустойчивой и «податливой» при температуре выше точки A_{c1} , оказывается энергетически подготовленной к перестройке (превращению) в аустенит – высокотемпературную фазу. Предрасположенность феррита к превращению способствует течению этого процесса по бездиффузионному механизму.

Указанные причины создают условия для бездиффузионного образования аустенита в приграничном феррите под воздействием более низкой температуры, чем $910\text{ }^{\circ}\text{C}$. Аустенит, возникающий по бездиффузионному механизму, первоначально неустойчив. Однако в силу большой растворимости углерода в нем происходит насыщение аустенита углеродом и стабилизация кристаллической структуры. Итак, при ускоренном нагреве конструкционной стали до температуры выше точки A_{c1} образуется больше, чем обычно, мелкозернистого аустенита. Процесс обратного структурного превращения при охлаждении от указанного нагрева идет неидентично преобразованию, которое происходит при охлаждении после выдержки при данной температуре или после медленного нагрева. Отличие состоит в том, что зерна аустенита имеют, во-первых, больший объем, чем в равновесном состоянии при A_{c1} , и, следовательно, меньшую удельную концентрацию углерода; во-вторых, аустенит мелкозернистый; в-третьих, в приграничных с ферритом областях аустенит содержит больше углерода (результат термодиффузии и диффузии при распространении $\alpha \rightarrow \gamma$ -превращения феррита) и поэтому там он более устойчив.

В процессе охлаждения стали с такой неоднородной структурой аустенита распад его происходит следующим образом: вначале распадаются на феррит и перлит те мелкие зерна аустенита, которые имеют меньшую концентрацию углерода, т.е. внутренние. Этому процессу немного способствует и то, что температура внутренних (центральных) в семействе аустенитных зерен несколько ниже, чем крайних. Мелкие зерна аустенита, граничащие с ферритом, подогреваются от перегретого феррита. Таким образом, распад зерен аустенита при охлаждении от нагрева начинается не с границ зерен $A - \Phi$, а внутри них, т. е. начинается выделением феррита в центральной части аустенитных зерен. В результате полного охлаждения на месте названных аустенитных зерен в их прежних границах образуется так называемый псевдоперлит, содержащий углерода меньше 0,8 %. Так, в результате

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2019. - Вип.33

«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33

ISSN 2522-9117 *«Fundamental'nye i prikladnye problemy černoј metallurgii». – 2019. – Vypusk 33*

одного быстрого нагрева стали до температуры несколько выше точки Ac_1 с последующим охлаждением получим структуру не смеси феррита и перлита ($\Phi + \Pi$), как обычно, а состоящую из зерен феррита и мелкозернистой смеси перлита и феррита, т. е. $\Phi + (\Phi + \Pi)$. Так, первый цикл нагрева и охлаждения всего лишь частично измельчает структуру, является шагом к полному измельчению зерен в стали.

При повторном нагреве стали аустенитизация перлита происходит известным образом. Однако при этом нагреве возникает метастабильный аустенит только в крупных зернах феррита, точнее на границе с аустенитом. Мелкие зерна аустенита, находящиеся внутри прежнего псевдоперлита (т. е. внутри мелкозернистой перлитно-ферритной смеси), в процессе превращения перлита в аустенит имеют меньшую температуру, чем периферийные, граничащие с ферритом. Эта разница в температурах происходит в силу поглощения тепловой энергии при $\alpha \rightarrow \gamma$ -превращении, которое начинается при нагреве в тех зернах перлита, содержание углерода в которых выше. А повышенное содержание углерода, как уже отмечалось, содержится в приграничных с ферритом зонах псевдоперлита. Начавшаяся аустенитизация, поглощая тепло, сдерживает поток тепловой энергии в центральные зоны псевдоперлита. Большие зерна оставшегося (исходного) феррита продолжают разогреваться, тогда как мелкие зерна феррита в псевдоперлите остаются некоторое время при постоянной температуре $\alpha \rightarrow \gamma$ -превращения. При этих условиях (температура феррита больше температуры ферритных зерен псевдоперлита) дальнейшая аустенитизация идет направленно – аустенитизируется перегретый (крупный) феррит. Причинами такой аустенитизации являются указанная разница в температурах при быстром нагреве и термодиффузия углерода в аустените в более нагретую, приграничную с ферритом зону.

В процессе охлаждения стали после второго нагрева кинетика распада аустенита аналогична описанной выше. Последующие циклы постоянно охватывают эвтектоидным превращением весь структурно-свободный феррит. Так, путем последовательных нагревов до температур несколько выше точки Ac_1 и охлаждений на воздухе до комнатных температур создается мелкозернистая структура в стали (рис. 2.) и соответствующее улучшение ее механических свойств. Однако нет смысла производить все охлаждения до комнатных температур. Структура пластинчатого перлита при охлаждении полностью формируется при температуре порядка 600°C . Дальнейшее охлаждение на воздухе не изменяет структуры стали. Поэтому охлаждения при термоциклировании для получения мелкозернистой структуры можно, а с экономической точки зрения нужно, производить до температур на $50\text{--}80^\circ\text{C}$ ниже точки Ar_1 , а потом вновь нагревать. Охлаждение после последнего нагрева следует

осуществлять на воздухе до комнатной температуры [3].

Установлено, что чем больше скорость нагрева при ТЦО и меньше перегревы над точкой A_{c1} , тем мельче зерно в углеродистой конструкционной стали. Однако при этом возрастает необходимое число циклов. Следует заметить, что быстрый печной нагрев при ТЦО достигается садкой металла в перегретую печь. [3-5].

Известно, что перлит при охлаждении стали из состояния аустенита, формируется не в момент прохождения температуры A_{r1} . Формирование цементита - процесс диффузионный. Для того, чтобы молекулы Fe_3C «выстроились» в пластинки цементита, необходимы достаточное переохлаждение и некоторое время для диффузии. Это приводит к тому, что при охлаждении после прохождения температуры A_{r1} вначале возникают центры кристаллизации цементита, а α -решетка железа еще в значительной степени пересыщена углеродом. Дальнейшее охлаждение сопровождается направленным ростом цементитных включений, и только при температурах на 80–100 °С ниже точки A_{r1} заканчивается процесс формирования перлита с пластинчатой формой цементита.

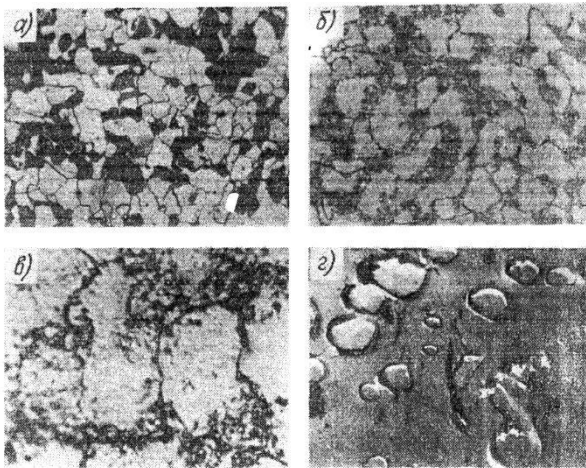


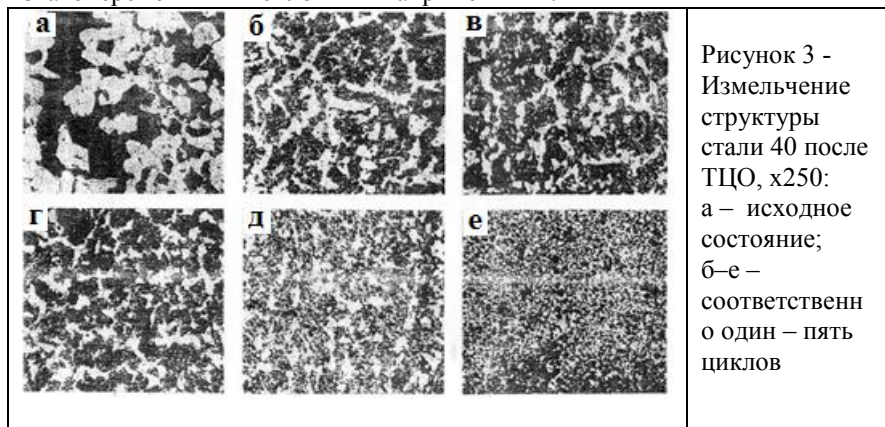
Рисунок 2 - Структура стали 30: а – исходное состояние, х250; б - после ТЦО, х250; в - после ТЦО, х750; г - после ТЦО, х5000

Таким образом, охлаждая быстро (в воде) с температур, например, на 30–50°С ниже точки A_{r1} , легко получить в стали структуру с преимущественно зернистой (шаровидной) формой цементита. При замачивании время охлаждения мало, и это мешает возможности диффузионного формирования пластинок цементита. Происходит выделение цементита, находящегося к моменту быстрого охлаждения в

стадии предвыделения, на существующие и вновь возникающие центры его кристаллизации [4].

Следовательно, для того чтобы в структуре стали получить цементит (или карбиды) не в виде пластинок, а в виде мелких зерен, необходимо в процессе среднетемпературных ТЦО нагрев вести до температуры несколько выше точки A_{c1} , охладить до начала перлитного превращения и, не дожидаясь его окончания, быстро охладить до комнатной температуры. В результате такой ТЦО в структуре, как инструментальных, так и конструкционных сталей (Рис 3) образуется зернистый перлит по всему объему металла, а не только на глубине закаленного и высокоотпущенного слоя. На рис. 2. приведены фотографии структур стали 30 до и после ТЦО [5–7].

В настоящее время ужесточение температурно-силовых режимов эксплуатации железнодорожного транспорта делает проблему надежности колес особенно актуальной, в частности, для высокоскоростных поездов при частых и резких торможениях. Цикл теплосмен в режиме «нагрев-охлаждение» оказывает существенное влияние на свойства стали. Долговечность металла будет зависеть от величины знакопеременных пластических деформаций, вызванных достаточно большими знакопеременными тепловыми напряжениями.



Исследовали влияние термоциклирования на изменение свойств отожженной среднеуглеродистой стали (0,55%С) с грубопластинчатым цементитом. Циклирование проводили по пилообразному циклу в интервале 20-600°C в установке типа Коффина на заземленных трубчатых образцах. Уже первые 10 циклов сопровождались резким увеличением коэрцитивной силы (H_c), ширины рентгеновской интерференции (220). Одновременно увеличилась микротвердость феррита и перлита. Возрастание H_c и $B_{(220)}$ свидетельствует о значительном

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2019. - Вип.33

«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33

ISSN 2522-9117 «Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii». – 2019. – Vypusk 33

повышении плотности дефектов кристаллической решетки при термоциклировании. Причиной возрастания плотности дефектов могут являться микронапряжения, возникающие в результате различных коэффициентов линейного расширения феррита и цементита, магнитострикционных напряжений и микронапряжения, обусловленные возникновением температурных градиентов в образцах. Однако при термоциклировании свободного образца все вышеперечисленные причины возникновения дефектов кристаллической решетки маловажны, так как после 3000 циклов, каких-либо изменений свойств не наблюдали. Следовательно, основной причиной значительного изменения свойств является пластическая деформация, возникающая при термоциклировании защемленного образца. Это можно объяснить тем, что размножение дислокаций в феррите происходит менее интенсивно, чем в перлите, из-за разного числа источников дислокаций. При этом возможны процессы динамического старения и полигонизации феррита, начальных стадий его рекристаллизации, а также сфероидизации пластин цементита. Отпуск деформированных сталей при 450-550°C приводит к упрочнению и снижению пластичности, причем в ферритных сталях и в сталях с глобулярным цементитом этот процесс играет незначительную роль. Таким образом, упрочнение перлита можно объяснить суммарным воздействием описанных факторов.

При увеличении числа циклов с 10 до 300 продолжают возрастать H_c и $V_{(220)}$, а микротвердость феррита и перлита уменьшаться. Рост H_c и $V_{(220)}$ свидетельствует об увеличении плотности дислокаций, что должно приводить к увеличению микротвердости. Наблюдающееся снижение микротвердости перлита можно связать с началом коагуляции карбидных частиц.

Заключение.

При одном термоцикле феррит в доэвтектоидных сталях почти не претерпевает изменений. Ферритно-перлитная структура претерпевает изменение после нескольких нагревов и охлаждений.

Установлено, что чем больше скорость нагрева при ТЦО и меньше перегревы над точкой A_{c1} , тем мельче зерно в углеродистой конструкционной стали. Однако при этом возрастает необходимость увеличивать число циклов термообработки.

Приведен механизм структурообразования, объясняющий эти явления, и практические рекомендации по реализации процесса ТЦО. Такой подход дает возможность сформировать оптимальную структуру металла. При этом могут быть существенно расширены возможности в части получения материалов с заданными свойствами и совершенствование на этой основе машин, конструкций, отдельных узлов и деталей. Все это ставит ТЦО в разряд перспективных направлений в металлообработке.

Библіографічний список

1. Івашко В.В. Структурні зміни в металах при ТЦО. Ленінград, 1990. – С.169–171.
2. Кидін І.Н. Фазові перетворення при прискореному нагріві сталі. М.: Металургія, 1997. – 280 с.
3. Ілларионов Е.І. Термоциклічна обробка металоприладів. Ленінград, 1992. – С. 71–73.
4. Кидін І.Н., Липчин Т.Н. Циклічна термообробка сталей. Перм, 1989. – С.62–68.
5. Шоршоров М.Х. Термоциклічна обробка сталей і сплавів. М.: Наука, 2004. – 186 с.
6. Федюкін В.К. Термоциклічна обробка сталей і чугунів. Л.: ЛГУ. 1997. – 193 с.
7. Федюкін В.К., Смагоринський М.Е. Термоциклічна обробка металів і деталей машин. Л.: Машинобудування, 1999. – 255 с.

Reference

1. Ivashko V.V. (1990). *Strukturnyye izmeneniya v metallakh pri TTSO [Structural changes in metals during thermal cycling metal treatment]*. Leningrad, 1990, 169–171. (In Russian).
2. Kidin I.N. (1997). *Fazovyye prevrashcheniya pri uskorennom nagreve stali [Phase transformations during accelerated heating of steel]*. Moskva: Metallurgiya, 1997, 280 p. (In Russian).
3. Illarionov E.I. (1992). *Termotsiklicheskaya obrabotka metalloizdeliy [Thermocyclic processing of metal products]*. Leningrad, 1992, 71–73p. (In Russian).
4. Kidin I.N. & Lipchin T.N. (1989). *Tsiklicheskaya termoobrabotka staley [Cyclic heat treatment of steels]*. Perm', 1989, 62–68p. (In Russian).
5. Shorshorov M.Kh. (2004). *Termotsiklicheskaya obrabotka staley i splavov [Thermocyclic treatment of steels and alloys]*. Moskva: Nauka, 2004, 186 p. (In Russian).
6. Fedyukin V.K. (1997). *Termotsiklicheskaya obrabotka staley i chugunov [Thermocyclic treatment of steels and cast irons]*. Leningrad: LSU, 1997, 193 p. (In Russian).
7. Fedyukin V.K. & Smagorinskiy M.Ye. (1999). *Termotsiklicheskaya obrabotka metallov i detaley mashin [Thermocyclic processing of metals and machine parts]*. Leningrad: Mashinostroyeniye, 1999, 255 p. (In Russian).

О.М. Перков, к.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0002-8101-4054

І.О. Вакуленко, д.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0002-7353-1916

В.М. Кузьмичев, зав. відділом, ORCID 0000-0003-2057-3001

Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України

Термоциклічна обробка (ТЦО) металів – шлях до отримання оптимальних структури і властивостей

Анотація. Метою цієї роботи є вивчення можливості використання термічної циклічної обробки (ТЦО) металів для отримання структур, що визначають оптимальний комплекс механічних властивостей. Наведено

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2019. - Вип.33

«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33

ISSN 2522-9117 «Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii». – 2019. – Vypusk 33

основні положення ТЦО металів з використанням періодично повторюваних циклів нагріву та охолодження. Метод ТЦО, як спосіб термообробки, заснований на постійному накопиченні від циклу до циклу позитивних змін в структурі металів. Дослідження показали, що при швидкому нагріванні зростання аустенітного зерна відбувається повільно, і тому нагрів до високих температур (до 1000°C) не веде до інтенсивного збільшення зерна. Встановлено, що збільшення розмірів зерен йде при змінній температурі нагріву в 3 рази повільніше, ніж в ізотермічних умовах при відповідній температурі. За умови, коли швидкість росту нової фази (аустеніту) мала, а швидкість зародження зерен значна, виходить, що до кінця $\alpha \rightarrow \gamma$ перетворення зберігається дрібнозерниста структура. Подальший нагрів, або витримка при постійній температурі, призводить до швидкого укрупнення зерен аустеніту. Якщо провести охолодження (наприклад, на повітрі) швидко нагрітої сталі на $10-15^{\circ}\text{C}$ вище температури точки A_{c1} , то внаслідок зворотного перекристалізації утворюється дрібне зерно перліту. При одному термоциклі феррит в доевтектійних сталях майже не зазнає змін. Але якщо зробити кілька таких нагрівань і охолоджень, то вся феритно-перлітна структура зазнає змін. Встановлено, що чим більше швидкість нагріву при ТЦО і менше перегріву над точкою A_{c1} , тим дрібніше зерно в вуглецевій конструкційній сталі. Однак, при цьому зростає необхідність збільшувати число циклів термообробки. Наведено механізм структуроутворення, що пояснює ці явища, і практичні рекомендації щодо реалізації процесу ТЦО. Такий підхід дає можливість сформувати оптимальну структуру металу. При цьому можуть бути істотно розширені можливості в частині отримання матеріалів із заданими властивостями і вдосконалення на цій основі машин, конструкцій, окремих вузлів і деталей. Все це ставить ТЦО в розряд перспективних напрямків в металообробці.

Ключові слова: термічна циклічна обробка, сталь, структурні перетворення, аустеніт, перліт, ферит

O.N. Perkov, к.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0002-8101-4054

I.A. Vakulenko, д.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0002-7353-1916

V.M. Kuzmychov, зав. відделом, ORCID 0000-0003-2057-3001

Iron and Steel Institute named after Z.I. Nekrasov of the NAS of Ukraine

Thermocyclic treatment (tcr) of metals - way for getting optimum structures and properties

Summary. The aim of this work is to study the basic principles of thermal cyclic processing (TCT) of metals to obtain structures that determine the optimal complex of mechanical properties. The basic provisions of metal heating centers using periodically repeated heating and cooling cycles are given. The TCT method, as a heat treatment method, is based on constant accumulation from cycle to cycle of positive changes in the structure of metals.

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2019. – Вип.33

«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33

ISSN 2522-9117 *«Fundamental'nye i prikladnye problemy černoј metallurgii». – 2019. – Vypusk 33*

Studies have shown that with rapid heating, the growth of austenitic grain occurs slowly and, therefore, heating to high temperatures (up to 1000⁰C) does not lead to an intensive increase in grain. It has been established that grain size increases at a variable heating temperature 3 times slower than under isothermal conditions at the corresponding temperature. Provided that the growth rate of the new phase (austenite) is small and the nucleation rate of grains is significant, it turns out that by the end of the $\alpha \rightarrow \gamma$ transformation, a fine-grained structure is retained. Further heating or holding at a constant temperature leads to a rapid coarsening of austenite grains. If cooling (for example, in air) of rapidly heated steel is performed 10–15⁰C higher than the temperature of the Ac₁ point, then fine perlite grain is formed due to reverse recrystallization. With one thermal cycle, ferrite in subeutectoid steels almost does not undergo changes. But if several such heating and cooling are performed, then the entire ferrite-pearlite structure undergoes a change. It has been established that the higher the heating rate during heating and heating and the less overheating above Ac₁, the finer the grain in carbon structural steel. However, this increases the need to increase the number of heat treatment cycles. The mechanism of structure formation explaining these phenomena and practical recommendations on the implementation of the process of the technical and economic process are presented. This approach makes it possible to form the optimal metal structure. At the same time, opportunities can be significantly expanded in terms of obtaining materials with desired properties and improving on this basis machines, structures, individual units and parts. All this puts TCT in the category of promising areas in metalworking.

Keywords: thermal cyclic treatment, steel, structural transformations, austenite, perlite, ferrite

For citation: Perkov O.N., Vakulenko I.A., Kuz'michev V.M. Termotsiklicheskaya obrabotka (TTSO) metallov – put' k polucheniyu optimal'nykh struktury i svoystv. [Thermocyclic treatment (TCT) of metals is a way to obtain optimal structure and properties.]. *«Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii»*. [Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy] 2020, 34. 238-252. (In Russian). DOI 10.52150/2522-9117-2019-33-238-252

*Статья поступила в редакцию сборника 15.11.2019 года,
прошла внутреннее и внешнее рецензирование (Протокол заседания
редакционной коллегии сборника №2 от 23 декабря 2019 года)*

СОДЕРЖАНИЕ СБОРНИКА
«Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии»
№ 33 (2019 г.)

Общие проблемы	
<i>Бабаченко А.И., Гармаш Л.И., Тубольцев Л.Г.</i> Творческий путь Института черной металлургии НАН Украины. 80 лет. (In Russian)	3
<i>Babachenko A.I., Tuboltsev L.G.</i> Trends in the development of energy-saving technologies in metallurgy. (In English)	33
Производство чугуна	
<i>Нестеров А.С., Гармаш Л.И.</i> Повышение эффективности доменной плавки за счет улучшения качества железорудных материалов. (In Russian)	43
<i>Семенов Ю.С., Шумельчик Є.І., Горупаха В.В.</i> Розробка і впровадження нових підходів до діагностики та управління доменною плавкою. (In Ukrainian)	61
Внепечная обработка чугуна	
<i>Шевченко С.А., Шевченко А.Ф., Толстомят А.П., Флеер Л.А., Елисеев В.И.</i> Исследование скорости дисперсных частиц при различных углах деления двухфазного потока. (In Russian)	78
<i>Шевченко А.Ф., Кисляков В.Г., Двоскин Б.В., Вергун А.С., Маначин И.А., Петруша В.П., Шевченко С.А.</i> Этапы научно-прикладной деятельности отдела внепечной обработки чугуна ИЧМ НАН Украины. (In Russian)	87
<i>Остапенко А.В., Шевченко С.А., Кисляков В.Г., Маначин И.А.</i> Влияние переключателя потока на равномерность движения двухфазного потока на основе зернистого магния. (In Russian)	98
<i>Тогобицкая Д.Н., Вергун А.С., Молчанов Л.С., Кисляков В.Г., Лихачев Ю.М., Ходотова Н.Е.</i> Подсистема «Внепечная обработка чугуна» в решении задач выбора рациональной технологии получения качественной металлопродукции в сложившихся сырьевых и технологических условиях. (In Russian)	106

Сталеплавильное производство	
Чернятевич А.Г., Молчанов Л.С., Вакульчук В.В., Юшкевич П.О., Кобеляцкий А.С. Физико-химические процессы в полости кислородного конвертера при продувке ванны с дожиганием отходящих газов. (In Russian)	116
Пиптюк В.П., Самохвалов С.Е., Вергун А.С., Греков С.В., Красников К.С. Разработка технологического регламента науглероживания чугуна в 30-т ковше. Часть 1. (In Russian)	129
Прокатное производство	
Раздобреев В.Г. Исследование влияния микролегирования бором на коррозионное поведение низкоуглеродистой конструкционной стали в различном структурном состоянии. (In Russian)	143
Раздобреєв В.Г., Паламар Д.Г. Дослідження впливу гарячої несиметричної сортової прокатки на формування мікроструктури, механічних властивостей та службових характеристик готового прокату. (In Ukrainian)	156
Приходько И.Ю., Дедик М.А., Стефан Брандт, Гогаев К.А., Иценко А.И., Воропаев В.С. Комплексное конечно-элементное исследование процессов производства титановых полос методами несимметричной холодной прокатки порошка с последующим спеканием. (In Russian)	173
Металловедение и материаловедение	
Тогобицкая Д.Н., Белькова А.И., Степаненко Д.А. Развитие базы знаний для моделирования физико-химических свойств металлургических систем и процессов. (In Russian)	193
Петров А.Ф., Снигура И.Р., Головкин Л.А., Цюпа Н.А. Прогнозирование времени плавления комплексных ферросплавов методом физико-химического моделирования	205
Степаненко Д.О., Яковичський О.В., Скачко О.С., Цюпа Н.О., Снігура І.Р. Експериментальні дослідження температур плавлення CaF_2 , пегматиту та їх сумішей з вапном. (In Ukrainian)	215

<i>Бабаченко О.І., Подольський Р.В., Кононенко Г.А. , Сафронова О.А. Порівняльний аналіз способів термічної обробки залізничних рейок та визначенням подальших напрямків підвищення їх експлуатаційної надійності. (In Ukrainian)</i>	224
<i>Перков О.Н., Вакуленко И.А., Кузьмичев В.М. Термоциклическая обработка (ТЦО) металлов – путь к получению оптимальных структуры и свойств. (In Russian)</i>	238
<i>Оглавление</i>	253
<i>Выходные данные сборника</i>	258

CONTENTS OF THE COLLECTION
"Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy"
№ 33 (2019)

<i>Common problems</i>	
<i>Babachenko A.I., Garmash L.I., Tuboltsev L.G.</i> Creative way of the Iron and Steel Institute of NAS of Ukraine. 80 years. (In Russian)	3
<i>Babachenko A.I., Tuboltsev L.G.</i> Trends in the development of energy-saving technologies in metallurgy. (In English)	33
<i>Pig iron production</i>	
<i>Nesterov A.S., Garmash L.I.</i> Increasing the efficiency of blast-furnace smelting by improving the quality of iron ore materials. (In Russian)	43
<i>Semenov YS, Shumelchik EI, Gorupakha VV</i> Development and implementation of new approaches to the diagnosis and management of blast furnace smelting. (In Ukrainian)	61
<i>Out-of-furnace treatment of cast iron</i>	
<i>Shevchenko S.A., Shevchenko A.F., Tolstopyat A.P., Fleer L.A., Eliseev V.I.</i> Study of the velocity of dispersed particles at different angles of division of a two-phase flow. (In Russian)	78
<i>Shevchenko A.F., Kislyakov V.G., Dvoskin B.V., Vergun A.S., Manachin I.A., Petrusha V.P., Shevchenko S.A.</i> Stages of scientific and applied activities of the department of external processing of the iron of ISI NANU. (In Russian)	87
<i>Ostapenko A.V., Shevchenko S.A., Kislyakov V.G., Manachin I.A.</i> Influence of flow switch on uniform motion of two-phase flow based on granular magnesium. (In Russian)	98
<i>Togobitskaya D.N., Vergun A.S., Molchanov L.S., Kislyakov V.G., Likhachev Yu.M., Khodotova N.E.</i> Subsystem "Out-of-furnace iron processing" in solving the problems of choosing a rational technology for obtaining high-quality metal products in the current raw material and technological conditions. (In Russian).	106

Steel production	
<i>Chernyatevich A.G., Molchanov L.S., Vakulchuk V.V., Yushkevich P.O., Kobelyatsky A.S.</i> Physicochemical processes in the oxygen converter cavity during bath purging with afterburning of exhaust gases. (In Russian)	116
<i>Piptyuk V.P., Samokhvalov S.E., Vergun A.S., Grekov S.V., Krasnikov K.S.</i> Development of technological regulations for the carburizing of cast iron in a 30-ton ladle. <i>Part 1.</i> (In Russian)	129
Rolling production	
<i>Razdobrev V.G.</i> Study of the effect of microalloying with boron on the corrosion behavior of low-carbon structural steel in different structural states. (In Russian)	143
<i>Razdobrev V.G., Palamar D.G.</i> Investigation of the influence of hot asymmetric rolling on the formation of microstructure, mechanical properties and performance characteristics of finished products. (In Ukrainian)	156
<i>Prikhodko I.Yu., Dedik M.A., Stefan Brandt, Gogaev K.A., Itsenko A.I., Voropaev V.S.</i> Comprehensive finite element study of titanium strip production processes using asymmetric cold rolling of powder with subsequent sintering. (In Russian)	173
Metal Science and Materials Science	
<i>Togobitskaya D.N., Belkova A.I., Stepanenko D.A.</i> Development of a knowledge base for modeling the physical and chemical properties of metallurgical systems and processes. (In Russian)	193
<i>Petrov A.F., Snigura I.R., Golovko L.A., Tsyupa N.A.</i> Prediction of the melting time of complex ferroalloys by the method of physical and chemical modeling. (In Russian)	205
<i>Stepanenko D.O., Yakovitsky O.V., Skachko O.S., Tsyupa N.O., Snigura I.R.</i> Experimental studies of melting temperatures of CaF ₂ , pegmatite and their mixtures with lime. (In Ukrainian)	215

<i>Babachenko O.I., Podolsky R.V., Kononenk G.A., Сафронова О.А.</i> Comparative analysis of methods of heat treatment of railway rails and determination of further directions of increasing their operational reliability. (In Ukrainian)	224
<i>Perkov O.N., Vakulenko I.A., Kuzmichev V.M.</i> Thermocyclic treatment (TCT) of metals - the way to obtain optimal structure and properties. (In Russian)	238
Table of contents	253
Collection output	258

Інститут чорної металургії ім.З.І.Некрасова
Національної академії наук України

**Фундаментальні та прикладні проблеми
чорної металургії**

Збірник наукових праць
Випуск 33
2019 рік

(Українською, англійською та російською та мовами)

Художній редактор – *Л.Г.Тубольцев*
Технічний редактор – *Л.Г.Тубольцев*
Комп'ютерна верстка – *Ю.І.Сушкіна*

Здано до складання 20.12.1* . Підписано до друку 23.12.19.
Формат 84 x 108/32. Ум. друк. арк. 9,0.
Обл.-вид.арк.12,8. Тираж 400.

Типографія «Візіон»
49050, м. Дніпро, пл. Академіка Стародубова, 1
Свідоцтво про держреєстрацію №04052442 Ю 0021076
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи 60-р

Інститут чорної металургії НАН України
49050, м. Дніпро, пл.Академіка Стародубова, 1



«Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии». – 2019. - Вып.33
«Fundamental'nye i prikladnye problemy černoј metallurgii». – 2019. – Vypusk 33
«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33