

Науково-технічний журнал
Зареєстровано в Міністерстві юстиції України
Свідоцтво про державну реєстрацію
засобу масової інформації: КВ № 24088-13928 ПР
від 6.08.2019 р.
Виходить 4 рази на рік
Видається з червня 1993 року

Рекомендовано до друку Вченою радою
Фізико-технологічного інституту металів
та сплавів НАН України

Журнал входить до Переліку наукових фахових видань України, затвердженого Наказом № 1301 від 15.10.2019 р. Міністерства науки та освіти України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук (технічні науки).

МЕТАЛ ТА ЛІТТЯ Україні

Том 27

№7-9(314-316)'2019

METAL AND CASTING OF UKRAINE

Засновник: Фізико-технологічний інститут металів та сплавів Національної академії наук України

Видавець: Фізико-технологічний інститут металів та сплавів Національної академії наук України

Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова Національної академії наук України

Асоціація ливарників України

Українська асоціація сталеплавильників

Бабаченко А.И., Меркулов А.Е., Тубольцев Л.Г.

Опыт и перспективы развития научной тематики в Институте черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины. 7

Тубольцев Л.Г., Бабаченко А.И.

Программный подход к развитию черной металлургии Украины в современных условиях 18

ВИРОБНИЦТВО ЧАВУНУ ТА СТАЛІ

Семыкин С.И., Голуб Т.С., Дудченко С.А., Вакульчук В.В.

Высокотемпературное исследование особенностей продувки металлической ванны в LD конвертере через кольцевое коаксиальное сопло. 27

Тогобицкая Д.Н., Белькова А.И., Степаненко Д.А., Петров А.Ф.

Методологические основы физико-химического моделирования и оптимизации процессов производства чугуна и стали. 33

Шевченко А.Ф., Маначин И.А., Двоскин Б.В., Кисляков В.Г., Шевченко С.А., Елисеев В.И., Вергун А.С., Остапенко А.В.

Теоретические и технологические основы обменных процессов при инжекционной десульфурации чугуна различными реагентами. 43

ОБРОБКА МЕТАЛІВ ТИСКОМ

Приходько И.Ю., Воробей С.А., Мацко С.В., Панченко В.С.

Повышение эффективности системы охлаждения валков широкополосного стана горячей прокатки (ШСГП) 1680. 51

Парусов Е.В., Левченко Г.В., Луценко В.А., Бобирь С.В., Парусов О.В., Чуйко І.М., Голубенко Т.М.

Наукові і технологічні основи виробництва високоефективних видів сортового та бунтового прокату . . . 60

Веренев В.В.

Прокатный стан – источник познания вибродинамических процессов. 69

Бабаченко О.І., Кононенко Г.А., Дьоміна К.Г.

Розробка хімічного складу та вдосконалення технології виробництва для підвищення експлуатаційної надійності і довговічності залізничної металопродукції 75

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА ПРОЕКТУВАННЯ МАШИН МЕТАЛУРГІЙНОГО ТА ЛИВАРНОГО ВИРОБНИЦТВА

Муравьева И.Г.

Комплексные исследования технологий, оборудования и систем автоматизации металлургического производства 83

Нестеров А.С., Чайка А.Л., Гармаш Л.И.

Отдел металлургии чугуна Института черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины. История и современность. 94

Scientific and technical Journal
Registered by the Ministry of Justice of Ukraine
State registration certificate of print media:
KB № 24088-13928 ПП
from 6.08.2019
Published 4 times a year
Issued since June 1993

Recommended for print by Scientific Council of the Physico-technological Institute of Metals and Alloys of the NAS of Ukraine

The journal is included into the List of Scientific Professional Editions of Ukraine, approved by Decree no. 1301 of 15.10.2019 of the Ministry of Education and Science of Ukraine, in which the results of PhD and Doctoral theses (in Technical Sciences) may be published.

METAL & CASTING of Ukraine

Vol. 27
№7-9(314-316)'2019

METAL AND CASTING OF UKRAINE

Founder: Physico-technological Institute of Metals and Alloys of the National Academy of Sciences of Ukraine

Publishers: Physico-technological Institute of Metals and Alloys of the National Academy of Sciences of Ukraine

Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov of the National Academy of Sciences of Ukraine

Foundry Association of Ukraine

Ukrainian Steelmakers Association

Babachenko A.I., Merkulov A.E., Tuboltsev L.G.

Experience and prospects for the development of scientific topics at Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov of the NAS of Ukraine. 7

Tuboltsev L.G., Babachenko A.I.

Program approach to the development of ferrous metallurgy in Ukraine in modern conditions 18

PRODUCTION OF IRON AND STEEL

Semykin S.I., Golub T.S., Dudchenko S.A., Vakulchuk V.V.

High temperature study of features of blowing a metal bath in LD converter through the annular coaxial nozzle. 27

Togobitskaya D.N., Bel'kova A.I., Stepanenko D.A., Petrov A.F.

Methodological bases of physical and chemical modeling and optimization of processes of production of iron and steel. 33

Shevchenko A.F., Manachin I.A., Dvoskin B.V., Kisliakov V.G., Shevchenko S.A., Eliseev V.I., Vergun A.S., Ostapenko A.V.

Theoretical and technological bases of exchange processes during injection desulfurization of hot metal with various reagents. 43

METAL PROCESSING BY DEFORMATION

Prykhodko I.Yu., Vorobei S.A., Matsko S.V., Panchenko V.S.

Improving the efficiency of the roll cooling system of the Hot Strip Mill 1680. 51

Parusov E.V., Levchenko G.V., Lutsenko V.A., Bobyr S.V., Parusov O.V., Chuiko I.N., Golubenko T.N.

Scientific and technological fundamentals of the production of highly efficient types of construction steel and wire rod 60

Verenev V.V.

Rolling mill – source of knowledge of vibrodynamic processes. 69

in the issue

Babachenko A.I., Kononenko A.A., Demina K.G.

Development of chemical composition and improvement of production technology to improve operational reliability and durability of rail metal products 75

OPERATION AND DESIGN OF METALLURGICAL AND FOUNDRY MACHINES

Muravyova I.G.

Integrated research of technologies, equipment and automation systems of metallurgical production 83

Nesterov A.S., Chaika A.L., Garmash L.I.

Department of Cast Iron Metallurgy of Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov of the NAS of Ukraine.
History and Modernity. 94

- Смірнов О.М.** головний редактор, д-р техн. наук, проф., пров. наук. співр.,
Фізико-технологічний інститут металів та сплавів Національної академії наук України, Київ, Україна
- Дубодєлов В.І.** заступник головного редактора, д-р техн. наук, проф., акад. НАН України, зав. відділу
Фізико-технологічний інститут металів та сплавів Національної академії наук України, Київ, Україна
- Верзілов О.П.** відповідальний секретар, канд. техн. наук, ст. наук. співр.,
Фізико-технологічний інститут металів та сплавів Національної академії наук України, Київ, Україна
- Бабаченко О.І.** д-р техн. наук, ст. наук. співр., директор,
Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова Національної академії наук України, Дніпро, Україна
- Величко О.Г.** д-р техн. наук, проф., чл.-кор. НАН України, ректор,
Національна металургійна академія України, Дніпро, Україна
- Гнилоскуренко С.В.** канд. техн. наук, зав. відділу,
Фізико-технологічний інститут металів та сплавів Національної академії наук України, Київ, Україна
- Гридін О.Ю.** д-р техн. наук, доц., заст. зав. кафедри,
Падерборнський університет, Падерборн, Німеччина
- Кавалек Г.А.** проф., Ченстоховський політехнічний університет, Ченстохова, Польща
- Камкіна Л.В.** д-р техн. наук, проф., декан металургійного факультету, проф. кафедри,
Національна металургійна академія України, Дніпро, Україна
- Клименко С.І.** канд. техн. наук, директор Департаменту ливарного виробництва
Фізико-технологічний інститут металів та сплавів Національної академії наук України, Київ, Україна
- Кондратюк С.Є.** д-р техн. наук, проф., зав. відділу
Фізико-технологічний інститут металів та сплавів Національної академії наук України, Київ, Україна
- Ладохін С.В.** д-р техн. наук, проф., гол. наук. співр.,
Фізико-технологічний інститут металів та сплавів Національної академії наук України, Київ, Україна
- Лихошва В.П.** д-р техн. наук, проф., зав. відділу,
Фізико-технологічний інститут металів та сплавів Національної академії наук України, Київ, Україна
- Лобанов Л.М.** д-р техн. наук, проф., акад. НАН України,
ІЕЗ ім. Є.О. Патона Національної академії наук України, Київ, Україна
- Мазур В.Л.** д-р техн. наук, проф., чл.-кор. НАН України, гол. наук. співр.,
Фізико-технологічний інститут металів та сплавів Національної академії наук України, Київ, Україна
- Найдек В.Л.** д-р техн. наук, проф., акад. НАН України, радник при дирекції,
Фізико-технологічний інститут металів та сплавів Національної академії наук України, Київ, Україна
- Ноговіцин О.В.** д-р техн. наук, ст. наук. співр., заст. директора з науково-технічної роботи,
Фізико-технологічний інститут металів та сплавів Національної академії наук України, Київ, Україна
- Нурадінов А.С.** д-р техн. наук, ст. наук. співр., пров. наук. співр.,
Фізико-технологічний інститут металів та сплавів Національної академії наук України, Київ, Україна
- Петренко В.А.** д-р техн. наук, проф., засл. діяч науки і техніки України,
Національна металургійна академія України, Дніпро, Україна
- Пономаренко О.І.** д-р техн. наук, проф., проф. кафедри,
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна
- Приходько І.Ю.** д-р техн. наук, ст. наук. співр., зав. відділу,
Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова Національної академії наук України, Дніпро, Україна
- Сігарьов Є.М.** д-р техн. наук, проф., зав. кафедри,
Дніпровський державний технічний університет, Кам'янське, Україна
- Чернятевич А.Г.** д-р техн. наук, проф., зав. відділу,
Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова Національної академії наук України, Дніпро, Україна
- Шинський О.Й.** д-р техн. наук, проф., зав. відділу, президент Асоціації ливарників України,
Фізико-технологічний інститут металів та сплавів Національної академії наук України, Київ, Україна

редакція



Редактор
Анастасія Андріївна Горшкова

Коректор
Надія Олександрівна Верховлюк



Макет
Сергій Анатолійович Цихмайстренко
Лілія Вікторівна Школяренко



Верстка
Ганна Романівна Верзілова

адреса редакції та друкарні

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

Думка редакції не завжди співпадає з думкою автора. Відповідальність за достовірність представлених матеріалів несуть автори статей. За рекламну інформацію відповідають рекламодавці.

Здано у набір 17.10.2019. Підписано до друку 12.12.2019. Формат 60x84/8. Папір офсетний № 1. Друк на різнографі
Обл.-вид. арк. – 14,65. Ум. друк. арк. – 12,67. Ум. фар.-от. – 13,60.

УДК 669.1.061.6

А.И. Бабаченко, д-р техн. наук, ст. науч. сотр., директор, e-mail: a_babachenko@i.ua, <https://orcid.org/0000-0003-4710-0343>**А.Е. Меркулов**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., зам. директора по научной работе, e-mail: office.isi@nas.gov.ua, <https://orcid.org/0000-0002-7867-0659>**Л.Г. Тубольцев**, канд. техн. наук, заслуженный работник промышленности Украины, зав. отделом, e-mail: isi.tubol@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9540-3037>

Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины (Днепр, Украина)

Опыт и перспективы развития научной тематики в Институте черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины

Изложена история создания Института черной металлургии (ИЧМ). Показано, что создание и становление Института определялось необходимостью развития черной металлургии страны. Институт объединил разрозненные в своей деятельности группы ученых-металлургов, которые работали в различных институтах страны. Программа работ ИЧМ, несмотря на его молодость, была широка и актуальна, что можно объяснить опытом, инициативностью и масштабностью деятельности ученых, которые возглавили отделы Института. Описаны истоки создания научной тематики Института, которая охватывала все основные передельные процессы черной металлургии. Приведены крупные научные разработки, созданные сотрудниками Института впервые в мировой и отечественной практике, которые в настоящее время составляют основу мировой металлургии. Выдающимися учеными Института было создано немало научных школ, которые и сегодня продолжают вносить неоценимый вклад в развитие научной тематики, реализацию результатов фундаментальных и прикладных исследований на металлургических предприятиях. Анализ показывает, что стратегическим направлением развития отечественной металлургии на перспективу является эволюционное изменение металлургических технологий. В этой связи приведены развиваемые в Институте основные направления научно-технического сопровождения технологий доменного, сталеплавильного и прокатного производства, термической обработки проката. Приведены примеры современных научных разработок Института.

Направления научных исследований Института черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины охватывают весь круг проблем производства металлопродукции, благодаря чему 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 в Украине технологическим и сырьевым условиям и их изменениям. Большинство новых разработок по технологическому содержанию и интеллектуальному уровню реализации не уступают мировым аналогам.

Ключевые слова: черная металлургия, технологии, научные школы, научно-техническое сопровождение металлургических технологий.

Состояние вопроса. В настоящее время в мировой металлургической промышленности преобладают следующие тенденции:

- продолжается рост мирового производства стали;
- приоритетным направлением развития металлургической промышленности продолжает оставаться повышение конкурентоспособности и снижение себестоимости производства;
- инвестиции и использование научных разработок в мировой металлургии остаются основой модернизации технологической и технической базы металлургического производства.

Подобные задачи развития металлургии стояли и перед Украиной, когда 9 декабря 1939 г. правительством было принято решение о создании Института черной металлургии (ИЧМ) в системе Академии наук Украины [1]. Создание Института было вызвано необходимостью научного сопровождения черной металлургии, перед которой в эти годы стояла задача

интенсивного развития и на пути развития которой возникли значительные трудности. Темпы развития черной металлургии существенно замедлились. Если в 1937 г. по сравнению с 1932 г. выплавка стали возросла в три раза, то за период с 1938 до 1940 г. – всего лишь на 0,6 %. Обеспечить дальнейший подъем производства металла можно было только за счет развития научных основ металлургических процессов. В идее создания ИЧМ было положение, что использование научных разработок должно стать основой модернизации металлургического производства Украины. Поэтому научная тематика была актуальна и востребована металлургическими предприятиями.

С момента создания, главной особенностью ИЧМ во все периоды его деятельности была направленность тематики на решение текущих и перспективных задач металлургии страны, проведение фундаментальных исследований в области черной металлургии и реализация их результатов в практику металлургического производства. Структура ИЧМ была

сформирована в соответствии с технологическими принципами современной черной металлургии, а научные подразделения охватывают все основные переделы черной металлургии. Практическая направленность исследований Института нашла отражение в целом ряде изобретений, послуживших основой создания новых технологий и оборудования. Разработки Института сформировали современное лицо отечественной и зарубежной черной металлургии и награждены многочисленными государственными премиями в области науки и техники.

Цель настоящей работы – анализ исторических и современных условий работы отечественной металлургической науки в соответствии с тенденциями развития мировой металлургии на примере научной деятельности Института черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины.

Методика проведения исследований основана на аналитическом изучении и анализе современных достижений и научной тематики одного из ведущих отечественных научно-исследовательских институтов металлургического профиля, использованных для совершенствования технологий производства металлургической продукции.

Основные результаты исследования. С момента создания ИЧМ АН УССР стал объединяющим началом для разрозненных групп ученых-металлургов, работающих в Украине. Организация работы Института была поручена его первому директору, академику АН УССР М.В. Луговцову. Это был видный ученый-доменщик, который внес весомый вклад в развитие отечественной металлургии. В Институте в разное время работали всемирно известные ученые – создатели новых научных школ и направлений: академики СССР и УССР М.В. Луговцов, Н.Н. Доброхотов, И.Н. Францевич, В.Н. Свечников, З.И. Некрасов, А.П. Чекмарев, К.Ф. Стародубов, В.И. Большаков, члены-корреспонденты академии наук Украины – К.П. Бунин, С.Н. Кожевников, д.т.н. Н.А. Воронова, И.Г. Узлов, Э.В. Приходько, И.Г. Товаровский, В.В. Парусов, и многие другие.

Можно отметить несколько важных этапов научной деятельности Института, которые характеризуются разработкой крупных проектов, созданием научных школ, реализацией в промышленности научных достижений. Научная тематика Института включила в себя наиболее важные проблемы отечественной металлургии.

Период 1939–1952 гг. характерен созданием организационных условий работы Института, решением важных задач повышения обороноспособности страны. Изучались вопросы перспективности использования керченских руд, совершенствования технологии выплавки мартеновской стали и конструкции мартеновских печей, проводились исследования процессов превращений в сталях при изотермическом нагревании в области субкритических температур. Уже в первые годы создания ИЧМ нашли признание труды его сотрудников в области доменного производства. Предложенный способ плавки чугуна на устойчивых шлаках обеспечил более ровный ход

печи, меньший расход кокса, более высокую производительность и получение заданного по составу чугуна. Во время войны научные работники ИЧМ приняли деятельное участие в решении задач по расширению сырьевой базы металлургической промышленности. Под руководством М.В. Луговцова разработаны технические предложения по строительству Узбекского металлургического завода и обеспечению его местным сырьем. И.Н. Францевич и Н.А. Воронова выполнили исследования по состоянию сырьевой базы металлургической промышленности Южного Урала. Н.Н. Доброхотов выполнил ряд важных разработок в области применения термодинамики и кинетики в металлургии, улучшения теплового режима мартеновских печей, разработал методы использования природного газа в мартеновском производстве, выполнил ряд усовершенствований технологии выплавки броневой стали для танкостроительных заводов. Член-корреспондент АН УССР П.Т. Емельяненко разработал метод расчета оптимальных геометрических параметров толстостенных труб, идущих на изготовление стволов артиллерийских орудий и минометов.

Сразу после освобождения территории Украины в 1943 г. от фашистских захватчиков сотрудники ИЧМ приступили к ликвидации тяжелых разрушений и восстановлению металлургических предприятий. И уже в 1951 г. в возведенных, по сути, заново сталеплавильных цехах, был превышен довоенный объем выплавки стали.

Для расширения научной базы исследований в 1946 г. из состава ИЧМ выделилась лаборатория металлофизики (впоследствии Институт металлофизики АН УССР), директором которой был назначен академик АН УССР Г.В. Курдюмов. В 1952 г. из состава ИЧМ выделилась самостоятельная лаборатория специальных сплавов, которая в 1955 г. была реорганизована в Институт металлокерамики и специальных сплавов АН УССР (Институт проблем материаловедения АН УССР). Начатые в ИЧМ исследования по разработке технологии литья отливок для металлургического оборудования были продолжены в Институте проблем литья АН УССР, созданном в 1958 г. Ныне это Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины.

В период 1939–1952 гг. Президиуму АН УССР пришлось решать необычный вопрос: где собственно территориально должен размещаться Институт черной металлургии. С одной стороны, для более тесной и живой связи с производством и решения вопросов развития черной металлургии лабораторная база Института должна была располагаться в непосредственной близости от металлургических предприятий (Приднепровье, Донбасс). С другой стороны, такая перспектива не устраивала большинство научных сотрудников из-за необходимости переезда из Киева. Однако в 1953 году этот вопрос был решен окончательно – ИЧМ должен базироваться в центре металлургии Украины – в г. Днепропетровске. Директором ИЧМ был назначен З.И. Некрасов. Вместе с директором Института З.И. Некрасовым в Днепропетровск приехали двое сотрудников – И.Б. Страшников и

Н.А. Воронова, которая впоследствии создала перспективный сегодня процесс внедоменной дусульфурации чугуна гранулированным магнезиом.

С 1953 г. ИЧМ традиционно проводит научные исследования в направлениях, востребованных металлургической промышленностью, в том числе такие, как:

- увеличение единичной мощности и производительности металлургических агрегатов, совершенствование оборудования металлургических агрегатов;

- улучшение качества металлургического железорудного сырья, использование отходов производства в доменной плавке, улучшение качества готовой продукции;

- интенсификация технологических процессов в доменном, сталеплавильном и прокатном производстве;

- совершенствование и модернизация кислородно-конвертерного производства с выводом из эксплуатации мартеновских печей;

- создание и освоение специальных технологических процессов для повышения физико-механических свойств и качества готовой металлопродукции;

- расширение сортамента готовой металлопродукции.

Из перечня выполненных в этих направлениях научных разработок ИЧМ следует отметить следующие.

Одна из первых разработок ИЧМ была направлена на расширение энергетической базы доменного производства. Впервые в мировой практике академиком З.И. Некрасовым было предложено использовать природный газ, который в то время был в избытке, в качестве энергоносителя для дувания в доменные печи. В октябре 1957 г. на доменной печи завода им. Петровского реализована подача природного газа в горн в количестве до 120 м³/т чугуна, что позволило снизить расход кокса на 10–16 %, повысить производительность печи на 3–5 %. Внедрение разработки позволило использовать обогащенное кислородом дутье, увеличить производительность доменной печи, уменьшить энергетические затраты и послужило основой для дальнейшего применения других альтернативных источников энергии в доменном процессе. В 1960 г. за внедрение природного газа в доменном производстве З.И. Некрасову присуждена Ленинская премия.

ИЧМ активно участвует в обновлении и модернизации производственных мощностей металлургии Украины. При непосредственном участии ученых Института научно обоснована возможность создания доменных печей большого объема, спроектирована и запущена в эксплуатацию крупнейшая в мире доменная печь объемом 5034 м³ на комбинате «Криворожсталь», разработаны мероприятия по увеличению объема доменных печей на комбинатах «Запорожсталь», Днепровском металлургическом и Макеевском.

Необходимость дальнейшего наращивания производства стали в 50–60-е годы прошлого века выдвинула на передний план довоенную концепцию разви-

тия, которая заключалась в строительстве большегрузных мартеновских печей. В результате структура мартеновского производства Украины была сформирована как минимум на 20–25 лет с учетом срока окупаемости металлургического оборудования. Был ли обоснован такой подход, на фоне роста объема выплавки кислородно-конвертерной стали в западных странах? Логика сформированной в Украине структуры мартеновского производства вполне оправдана и имеет серьезное обоснование. Во-первых, мартеновские печи с наименьшими затратами в сравнении с электропечами позволяли переработать накопления послевоенного стального лома. Во-вторых, геологические работы и начало строительства последнего мартеновского цеха с большегрузными печами (введен в действие на заводе им. Ильича в 1962 г.) относятся к середине 50-х годов, то есть до начала «эпохи бурного распространения кислородно-конвертерного процесса». В то же время мартеновский цех строился с учетом современных научных, проектных и конструкторских разработок. В совершенствование этого процесса крупный вклад внесли сотрудники ИЧМ под руководством д-ра техн. наук И.И. Кобезы и канд. техн. наук В.Я. Ботвинского. Выполняя научно-техническое сопровождение мартеновского производства, сотрудники созданного в 1995 г. отдела металлургии стали ИЧМ участвовали в реконструкции мартеновских печей в двухванные агрегаты, что явилось в то время крупным научно-техническим достижением. Так, на основе сопоставительного анализа работы мартеновских печей с различной массой садки (от 70 до 300 т) было установлено, что при удвоении массы садки производительность печи возрастает, по меньшей мере, в полтора раза. Кроме того, увеличение производительности агрегата достигали за счет применения технического кислорода. В середине 70-х годов прошлого столетия в Украине выплавлялось около 33–34 млн т мартеновской стали в год, что составляло примерно две трети от всего объема выплавляемой стали.

Вместе с тем, в 60-х годах в ИЧМ широко развивалась и тематика кислородно-конвертерного производства. Две лаборатории конвертерного производства проводили исследования по выявлению эффективности процесса с комбинированной продувкой, по использованию повышенной доли металлолома в конвертере, по разработке эффективных продувочных устройств, по повышению стойкости футеровки конвертера и целому ряду других проблем конвертерного производства. Большой вклад в развитие отечественного конвертерного производства внесли д-р техн. наук Я.А. Шнееров, Р.В. Старов, канд. техн. наук В.В. Смоктий и В.П. Корченко. Кроме теоретических исследований, они проводили большую работу по разработке технологических заданий на проектирование отечественных большегрузных конвертеров и освоение технологии конвертерной плавки на металлургических предприятиях. Разработаны мероприятия и проведено научно-техническое сопровождение создания кислородно-конвертерного цеха комбината «Азовсталь», нового конвертера и

реконструкции существующих на комбинате «Криворожсталь», реконструкции кислородных конвертеров Днепропетровского металлургического завода.

Начало 70-х годов характеризуется быстрым внедрением непрерывной разливки стали на многих металлургических заводах промышленно развитых стран мира. В Украине процессам непрерывной разливки пришлось конкурировать с консервативным, но сравнительно дешевым процессом разливки стали в слитки. При развитом мартеновском производстве использование машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) встречало определенные финансовые и конструктивные трудности. Потребовалось создание новой системы технологий в сталеплавильном переделе. Оснащение действующих конвертерных цехов МНЛЗ и реконструкция сравнительно новых крупных мартеновских в соответствии с новой системой технологий требовало рассмотрения возможности второго пути совершенствования структуры сталеплавильного производства – реконструкции крупных мартеновских цехов. В результате научно-технического прогресса и кропотливой научной работы ученых Украины, в том числе и ИЧМ, все основные качественные и количественные показатели, достигаемые при непрерывной разливке стали, заметно превзошли параметры слиткового передела.

В 1958 г. впервые в практике прокатного производства на блюминге 1150 завода им. Дзержинского была применена технология сдвоенной прокатки слитков. По сравнению с одиночной прокаткой, новая технология обеспечила увеличение производительности обжимного стана на 15–30 % вследствие уменьшения времени пауз, ликвидации периодов торможения при выбросе из валков первого слитка и разгона при захвате второго, увеличения максимальной скорости прокатки. Пионерами в разработке новой технологии явились специалисты завода им. Дзержинского и ученые ИЧМ под руководством академика А.П. Чекмарева.

В 1962 г. под руководством А.П. Чекмарева началась разработка крупнейшей комплексной проблемы «Непрерывная и бесконечная прокатка», которая завершилась созданием впервые в мировой практике ряда мелкосортных станов бесконечной прокатки. Впервые в мировой практике прокатного производства в 1965 г. получена промышленная партия проката со сварным швом. Это открыло большие перспективы развития прогрессивного способа «бесконечной прокатки». Бесконечная прокатка сегодня получает широкое развитие в мировой практике.

При непосредственном участии Института спроектированы и построены новые прокатные станы: непрерывный проволочный стан 250/3 на комбинате «Криворожсталь», уникальный толстолистовой стан 3600 завода «Азовсталь», трубозлектросварочный стан (Харьцызск), новый колесопрокатный стан на Нижнеднепровском трубопрокатном заводе. На широкополосных станах горячей и холодной прокатки комбинатов «Запорожсталь» и ММК им. Ильича сотрудники Института ведут исследования по совершенствованию температурно-деформационных

режимов прокатки и улучшению качества готовой продукции. Практически на всех прокатных станах Украины использованы и внедрены разработки сотрудников ИЧМ.

В 1964 г. сотрудниками отдела механизации и автоматизации Института под руководством С.Н. Кожевникова, Б.М. Климковского, А.С. Ткаченко разработана и внедрена принципиально новая конструкция стана холодной прокатки труб и новое оборудование, позволившие значительно увеличить производительность за счет уравнивания сил инерции возвратно-поступательного движения масс стана. В 1968 г. комплекс изобретений был удостоен Государственной премии СССР за создание и широкое внедрение в промышленность гаммы высокопроизводительных универсальных станов холодной прокатки труб с комплексом новых механизмов.

В 1965 г. на основании данных опытной плавки на агломерате из богатого концентрата, проведенной доменщиками Института на заводе «Криворожсталь», Приднепровский Совнархоз утвердил новую технологию и принял решение о реконструкции обогатительных фабрик Кривбасса с целью выпуска концентрата с содержанием железа 64–65 %, что стало крупным шагом по производству в Украине обогащенного железорудного сырья.

В 1966 г. впервые в мире на Днепропетровском металлургическом заводе им. Г.И. Петровского сотрудниками ИЧМ успешно проведена опытная плавка с заменой обычного кокса формованным, полученным из газовых и слабоспекающихся углей. В этом же году построена первая в стране промышленная установка для термоупрочнения арматурной стали с прокатного нагрева в потоке мелкосортного стана завода «Криворожсталь». Технология разработана учеными ИЧМ под руководством академика К.Ф. Стародубова.

В 1970 г. впервые в мировой практике на доменной печи № 3 завода «Запорожсталь» под руководством академика З.И. Некрасова освоена технология плавки при подаче в горн пылеугольного топлива с помощью установки конструкции ИЧМ. К результатам этого года можно также отнести завершение освоения на заводе им. К. Либкнехта разработанной ИЧМ технологии вертикальной прерывистой закалки цельнокатаных железнодорожных колес, позволяющей повысить их долговечность на 15 %; а также завершение строительства на заводе им. Ильича отделения для десульфурации чугуна по технологии ИЧМ.

В 1972 г. сталеплавильщиками ИЧМ выплавлена серия опытных плавок с микролегированием рельсовой стали титаном или магнием, что улучшило ее хладостойкость и износостойкость. За разработку и широкое внедрение в народное хозяйство полуспокойных сталей взамен спокойных сотрудники отдела металлургии стали (ОМС) Я.А. Шнееров, В.А. Вихлевщук и А.С. Стороженко удостоены Государственной премии УССР.

В 1974 г. комплексная бригада ИЧМ под руководством д-ра техн. наук И.Г. Узлова активно участвовала в освоении поточной линии № 2 колесопрокатного цеха завода им. К.Либкнехта, созданной по техноло-

гическому заданию Института.

В 1975 г. в ИЧМ успешно выполнялись крупные научные исследования на уровне мировых достижений, определившие направления научно-технического прогресса в отрасли, в том числе:

- технология плавки с использованием богатого железом концентрата;
- использование кислорода и природного газа;
- разработка крупных доменных печей;
- совершенствование мартеновского производства за счет использования кислорода для продувки ванны;
- совершенствование кислородно-конвертерного производства продувкой ванны кислородом в струе защитного газа через днище в конвертере;
- создание новых марок полуспокойной стали;
- бесконечная прокатка на непрерывных сортовых станах;
- повышение точности размеров проката;
- улучшение качества тонкого листа за счет установления рациональных режимов обработки валков, создания рациональной технологии прокатки, разработки и внедрения надлежащих видов технологических смазочных средств;
- разработка и внедрение технологии и оборудования для термообработки проката в потоке станов – круглых профилей, швеллеров, балок, цельнокатанных колес, труб большого диаметра, толстого листа, катанки.

В 1976 г. впервые в практике доменного производства ученые ИЧМ провели на доменной печи № 4 объемом 2000 м³ опытную плавку с доведением содержания кислорода в дутье до 40 % и показали возможность увеличить производительность печи более чем на 500 тонн в сутки.

В 1978 г. в ИЧМ завершено обобщение комплекса теоретических и экспериментальных исследований процесса получения прочных окускованных материалов оптимальных размеров и геометрии и неразрушающихся при восстановительно-тепловой обработке. Эта разработка сегодня находит широкое применение в отечественной и мировой практике металлургического производства.

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

В 1982 г. при участии ученых Института завершен комплекс работ по организации на Мариупольском металлургическом комбинате им. Ильича (ММК) производства высококачественной горячекатаной листовой стали марок 08ЮА – 20ЮА, которая используется более чем на 250 предприятиях-потребителях.

В 1983 г. сотрудниками ИЧМ освоена работа первого бесконусного загрузочного устройства на доменной печи № 6 «Криворожстали»; внедрена технология доменной плавки с частичной заменой природного газа коксовым с экономией кокса 6–7 % и приростом производительности печей на 5 %; вне-

дрена технология передела низкомарганцовистого чугуна в кислородных конвертерах, позволяющая получить сквозную экономию марганца 2,0–3,5 кг/т стали; выполнено промышленное опробование нагрева слитков с жидкой сердцевинной и прокатка на блюминге 1300 «Криворожстали», что дает возможность на 25–30 % сократить время нагрева и обеспечить экономию 10 % топлива; внедрена технология термического упрочнения с прокатного нагрева угловых профилей с самоотпуском.

В 1986 г. освоена технология термического упрочнения тонкого листа из низкоуглеродистых сталей на стане 3600 «Азовстали», позволившая повысить прочностные характеристики листа.

В 1990 г. сотрудниками ИЧМ завершены разработка и стендовые испытания технических решений по получению и вдуванию в доменную печь продуктов газификации низкосортных углей. Испытания на стенде прифурменного реактора-газификатора пылеугольного топлива и на плавильном циклоне завода им. Петровского показали возможность стабильного получения восстановительного газа с температурой 1900–2000 °С. Сегодня это направление является одним из перспективных направлений совершенствования доменного производства. Отработана технология и оборудование комплекса десульфурации чугуна известью в заливочных ковшах конвертерного цеха № 2 меткомбината «Криворожсталь», что обеспечило содержание серы в чугуне 0,010–0,018 % и очищение от шлака на 80–90 %. На меткомбинате «Азовсталь» внедрена усовершенствованная технология и оборудование дозирования магния, обеспечивающие при десульфурации чугуна повышение степени усвоения магния до 80–90 %. В результате, отработана промышленная технология получения чугуна с содержанием серы менее 0,003 %. Объем производства низкосернистого чугуна составил 3 млн т в год.

Комплексные разработки по сквозному циклу производства металлургической продукции позволили Институту выступить инициатором и разработчиком системы управления качеством продукции на металлургических предприятиях, основные принципы которой использованы в последующем для создания аналогичных систем на зарубежных металлургических предприятиях.

В период становления самостоятельности Украины ИЧМ продолжал научные исследования по совершенствованию металлургических технологий, однако кризис в металлургии Украины и тяжелое экономическое положение Института несколько снизили объемы выполняемых исследований. В этот период было практически заморожено проведение научных и технологических разработок для металлургических предприятий, отсутствовали финансовые возможности для создания экспериментальных образцов новых технологий и оборудования. Однако Институт даже в это тяжелое время сумел сохранить основные научные и инженерные кадры. В немалой степени этому способствовали настрой и квалификация сотрудников, а также философия научных школ

Института, которые были созданы в Днепропетровский период становления ИЧМ.

В ИЧМ работают крупные научные школы, которые существуют и поныне благодаря талантливым ученикам выдающихся ученых, работавших в Институте [2]. Сегодня в Институте продолжают активную работу созданные научные школы доменщиков Некрасова-Большакова, внепечной обработки чугуна Вороновой-Шевченко, сталеплавыльщиков Шнеерова-Чернятевича, теплотехников Кобезы-Бородулина, прокатчиков Чекмарева-Мелешко-Мазура, термистов и металлургов Стародубова-Бунина-Узлова, машиноведения и систем управления металлургическими процессами Кожевникова-Праздничкова-Муравьевой.

Академик З.И. Некрасов вместе с академиком НАН Украины В.И. Большаковым создали замечательную плеяду ученых-доменщиков, которые и сегодня поддерживают доменное производство Украины на мировом уровне.

Член-корреспондент АН Украины С.Н. Кожевников создал уникальную школу машиноведов в ИЧМ, ученики которого и сегодня работают на передовых позициях металлургической науки и производства.

Академик А.П. Чекмарев – создатель уникальной школы прокатчиков в Институте черной металлургии и Днепропетровском металлургическом институте. Многие процессы непрерывной прокатки были созданы учеными школы прокатчиков впервые в мировой практике и получили широкое распространение в мировой практике. Научные разработки прокатчиков еще далеко не исчерпаны.

Члены-корреспонденты АН Украины К.П. Бунин и Ю.Н. Таран заложили основы школы металлургов Института, традиции которой бережно сохраняются и поддерживаются в Институте и сегодня.

Академик К.Ф. Стародубов – создатель одного из самых прогрессивных процессов в металлургии – термической обработки проката с прокатного нагрева. Его научная школа-термистов продолжает работать и сегодня. Одним из наиболее ярких представителей этой школы является И.Г. Узлов – тематика производства и термообработки железнодорожных колес является и сегодня одной из самых затребованных в Украине.

Мы сегодня с огромным уважением храним память об ученых Института, внесших неоценимый вклад в развитие научной тематики, реализацию результатов фундаментальных и прикладных исследований на металлургических предприятиях, в создание имиджа ИЧМ как ведущей научной организации металлургической отрасли, а сегодня – практически единственного в Украине комплексного научно-исследовательского института, охватывающего научной тематикой практически все металлургические переделы [3].

Продолжая традиции научных школ, коллектив Института выполнил комплекс фундаментальных исследований и реализовал их результаты на металлургических предприятиях Украины и мира в виде новых технологий и оборудования. Все современные направления модернизации металлургических процессов продолжают оставаться приоритетными

в тематике научных исследований Института черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины за последние 5 лет [4, 5].

В области аглодоменного производства фундаментальные и прикладные работы проводили в направлении исследования процессов, протекающих при окомковании железорудного сырья с примесями вторичных ресурсов, и процессов, протекающих при производстве чугуна в доменных печах, особенно при использовании пылеугольного топлива.

Разработанные процессы спекания шихты с переменным составом минерального сырья и использования до 12 кг/т чугуна вторичных ресурсов позволяют увеличить на 2,4 % прочность агломерата, уменьшить вынос колошниковой пыли на 4,3 кг/т чугуна, снизить расход кокса на 9,6 кг/т чугуна.

Продолжены исследования по разработке перспективных технологий и показана перспективность использования горячих восстановительных газов в доменной плавке для существенного уменьшения расхода энергоносителей. Выявленные закономерности стали основой формирования рациональных режимов новой технологии, необходимость разработки которой обусловлена дефицитом низкотемпературного угля для технологии вдувания пылеугольного топлива.

Разработаны научно-практические основы, методология и система технологического сопровождения перехода доменных печей от работы с природным газом до рационального применения пылеугольного топлива (ПУТ). Результаты работы нашли промышленное использование на доменных печах Украины, работающих с ПУТ.

Продолжая исследования процесса доменной плавки, в Институте разработана методика моделирования процессов распределения элементов шихты между продуктами плавки, что позволяет сформировать структуру комплексных показателей агрегатного преобразования сырья в печи и температурно-дутьевые условия плавки, обеспечить прогнозирование состава продуктов плавки на базе направленного формирования свойств конечного шлака и качества чугуна.

Впервые получены аналитические зависимости для определения рациональных параметров работы безконусного загрузочного устройства (БЗУ), использование которых повышает эффективность реализации заданного распределения шихты на колошнике. С учетом полученных результатов разработаны технические задания на модернизацию систем автоматического управления БЗУ на ряде металлургических предприятий Украины.

На основе результатов компьютерного моделирования разработаны и реализованы мероприятия по обеспечению необходимого объема производства доменных печей ПАТ «МК «Азовсталь» за счет увеличения пропускной способности системы загрузки, рациональных параметров работы оборудования БЗУ и шихтоподачи, рационального распределения шихтовых материалов на колошнике, рациональных

параметров и состава дутья, газодинамического режима, что позволило в 2018 г. увеличить производство чугуна с 3900 т/сутки до 4360 т/сутки.

Продолжаются работы по созданию систем экспертной оценки и автоматизации работы доменных печей. В частности, разработаны принципы, создана и сдана в промышленную эксплуатацию система автоматизированного контроля тепловой работы и разгара шахты доменной печи № 4 ОАО «Запорожсталь».

В области внедоменной обработки чугуна в последние годы все большую актуальность получают исследования, начатые под руководством д-ра техн. наук, проф. Н.А. Вороновой в области теории и технологии внепечной обработки чугуна. Способы и оборудование для внепечной обработки чугуна гранулированным магнием запатентованы в 21 стране мира и внедрены на предприятиях Украины (ММК им. Ильича, ММК «Азовсталь», МК «Запорожсталь») и за рубежом: НЛМК, Раутаруукки (Финляндия), корпорация CSC (Тайвань). Под руководством д-ра техн. наук А.П. Шевченко по зарубежным контрактам проводились работы по внедрению установок внепечной обработки чугуна гранулированным магнием на 37 металлургических комбинатах КНР. Такой подход обеспечил лидирующее положение отечественной науки в мире в этой области знаний. В последние годы в Институте получены результаты, обеспечивающие высочайшую эффективность использования магния и глубину десульфурации чугуна, что позволило существенно улучшить результаты процесса десульфурации как по повышению качества чугуна, так и по сокращению затрат на обработку и продолжительность операции. В результате теоретических и экспериментальных исследований получены новые данные, которые позволили разработать рекомендации по технологии комплексной десульфурации и дегазации чугуна. Разработаны и переданы всем металлургическим предприятиям Украины технологические предложения по новой технологии десульфурации чугуна.

В области сталеплавильного производства фундаментальные и прикладные разработки проводили в сфере разработки новых технологий кислородно-конвертерного производства и совершенствование технологии улучшения стали путем внепечной обработки стали в агрегатах «ковш-печь». Получили развитие представления о механизме, гидрогазодинамических и тепломассообменных процессов, сопровождающих продувку конвертерной ванны через двух- и трехъярусные фурмы со специально ориентированными рядами над- и дозвуковых кислородных струй. На основе полученных результатов разработана новая промышленная технология комбинированной кислородно-конвертерной плавки с использованием многоярусной фурмы для продувки ванны «сверху».

Усовершенствовано технологию конвертерной плавки с наложением электрического потенциала на систему «фурма-конвертерная ванна». Предложен новый способ уменьшения количества королек в

шлаке путем снижения вязкости расплава: за счет температурного фактора анодного дожигания CO в CO₂. Продолжаются исследования по использованию активированных струй кислорода в процессе кислородно-конвертерной плавки.

Продолжались работы по совершенствованию технологии ковшовой обработки стали в агрегате «ковш-печь» на основе исследования процессов плавления и растворения ферросплавов и лигатур различного состава в зависимости от положения дутьевых устройств и параметров обработки расплава. Впервые установлено влияние зоны введения кускового ферромарганца на установке «ковш-печь» и расположения донного продувочного узла фурм в ковше емкостью 250 т на продолжительность плавления добавки и гомогенизации металла по содержанию марганца. Использование предложенных разработок в условиях ПАО «Днепропетровский МК» обеспечило повышение устойчивости футеровки сталеразливочных ковшей в кампании на 10–18 %, снижение на 20–40 % химической и на 0,5 балла структурной неоднородности непрерывнолитой заготовки. Качество металлопродукции по неметаллическим включениям улучшилось с 3–5 баллов до 1–2 баллов.

В области прокатного производства продолжены исследования особенностей работы прокатного оборудования и влияния параметров процессов прокатки, характеристик раската различного профиля, значений межклетевых натяжений, параметров системы охлаждения валков на работу оборудования и качество металлопродукции широкого сортамента и назначения.

Впервые установлены закономерности влияния параметров процесса прокатки, систем и элементов сортовых калибров на распределение температуры по объему раската и интенсификацию деформации центральных зон пересечения раската. Это позволяет разрабатывать усовершенствованные алгоритмы систем автоматического регулирования толщины и натяжения полосы.

Разработаны новые методы расчета и алгоритм управления охлаждением валков, позволяющие обеспечивать стабилизацию температуры и теплового профиля рабочих валков в зависимости от изменения условий охлаждения в процессе прокатки. Установлено положительное влияние криогенной обработки на повышение износостойкости специальных валковых сталей типа 65X2C3МФ – от 25 до 40 %. Разработана новая технология термической обработки стали 38ХН3МФА с использованием после закалки с отпуском криогенной обработки при температуре 150 °С.

Создана энергосберегающая технология изготовления высококачественного титанового полосового проката с использованием метода асимметричной прокатки порошков.

Определены направления совершенствования валковых прессов конструкции ИЧМ высокой производительности 25–50 т/час брикетов. Пресса имеют высокую ремонтпригодность и ресурс эксплуатации; новую конструкцию бандажей валков;

гидравлическое устройство для защиты от перегрузок в пределах до 2500–3000 кН; шнековый подпрессовщик, что стабилизирует процесс производства качественных брикетов из материалов с малой насыпной плотностью 0,2–0,5 г/см³.

В области материаловедения и термической обработки металлов продолжались исследования влияния химического состава сталей и режимов термической обработки проката на его структурное состояние и механические свойства.

Аналитическим путем определены рациональный химический состав стали и технологические параметры производства горячего деформированного арматурного проката с винтовым профилем для анкерного крепления горных выработок высокой и особо высокой несущей способности (классы АШ500 и АШ600). Впервые в Украине производство данных видов проката освоено из непрерывнолитых заготовок.

Разработана технология производства на новом сортопрокатном проволочном стане 400/200 ОАО «ДМК» арматурного проката в мотках № 6–16 классов прочности А400, А500 и А600 из микролегированной ниобием и/или ванадием стали с реализацией процесса двухстадийного ускоренного охлаждения проката водой и на транспортере Стелмор. Разработана технология производства катанки диаметром 5,5–16 мм из стали марок SAE1006, Ст1кп, СтЗсп (пс).

Разработан химический состав стали и новый энергосберегающий режим термической обработки инструмента горячей деформации из сталей 12Х5М и 17Х5МА – оправок пресса 10000 тонн и головок пресс пуансона пресса 2000 тонн. Средняя устойчивость головок повышена на 146 %.

Разработана сквозная технология термомеханической обработки катанки повышенной деформируемости, предназначенной для изготовления высокопрочных арматурных канатов с низкой релаксацией. Достигнут экономический эффект в размере 697 грн/т проката.

Впервые установлены закономерности распада переохлажденного аустенита при непрерывном охлаждении с различными скоростями (от 0,2 до 20 °С/с) стали для железнодорожных рельсов с повышенным содержанием марганца и микролегированной ванадием. Определены предельные скорости охлаждения: максимально допустимую для поверхности катания головки рельса, при которой не происходит образование мартенсита и достигается твердость на уровне мировых аналогов.

Впервые установлены закономерности фазовых превращений при непрерывном охлаждении стали для железнодорожных колес с повышенным содержанием кремния. С учетом модернизации: оборудования колесопрокатного цеха ОАО «ИНТЕРПАЙП НТЗ» разработаны режимы ускоренного охлаждения при термической обработке железнодорожных колес различного химического состава. Разработаны рекомендации по выбору оптимальных геометрических параметров исходной заготовки (диаметр – 450 мм, высота – 380 мм) для производства железнодорож-

ных колес и их температуры нагрева. Установлены закономерности образования эксплуатационных дефектов термического происхождения на поверхности катания железнодорожных колес, проведен комплекс работ по совершенствованию химического состава сталей для производства железнодорожных осей и колес, и технологических параметров их термической обработки.

Институт имеет многолетние партнерские связи практически со всеми предприятиями горно-металлургического комплекса (ГМК) Украины, среди которых: Мариупольский металлургический комбинат имени Ильича, металлургический комбинат «Азовсталь», ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог», Запорожский металлургический комбинат «Запорожсталь», «Интерпайп Сталь», «Интерпайп НТЗ», Днепропетровский металлургический завод, Днепропетровский металлургический комбинат, Днепропетросталь, «Силур», ЕВРАЗ и др. Важные исследования выполняются для «Укрзалізниця». К сожалению, потеряно связи с крупными металлургическими предприятиями, которые находятся на временно оккупированной территории (Енакиевский металлургический завод, Донецкий и Алчевский меткомбинаты).

Поскольку металлургия является одной из базовых отраслей экономики Украины, решение актуальных проблем металлургического комплекса является одной из важных задач национальной стратегии [6, 7]. Среди первоочередных – уменьшение энерго- и материалоемкости производства и внедрения новейших технологий, обеспечение конкурентоспособности продукции и ее экспортного потенциала.

На перспективу развитие научной тематики Института черной металлургии планируется в следующих направлениях:

- проведение научной теоретической, экспериментальной и научно-технической деятельности для получения новых знаний о закономерностях технического и практического развития науки и техники в металлургической отрасли;
- создание научной и научно-технической продукции, которая может быть использована для обеспечения национальной экономической безопасности;
- подготовка научных кадров;
- внедрение научных достижений в производство;
- изучение и обобщение достижений мировой науки и содействие их использованию в металлургической отрасли Украины.

Выводы

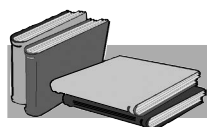
Стратегическое значение Института черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины заключается в том, что в настоящее время он является практически единственной государственной научной организацией, которая проводит внедрение результатов комплексных фундаментальных исследований в практику работы металлургических предприятий и участвует в разработке промышленной политики по развитию металлургической отрасли. Такая стратегия развития Института является признанной

как металлургическими предприятиями страны, так и руководящими органами управления металлургической отраслью, позволяет ИЧМ быть ведущей организацией и «центром притяжения» для специалистов региональных групп металлургов Украины и зарубежья.

Направления научных исследований Института черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины охватывают весь круг проблем производства металлопродукции, благодаря чему 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 в Украине технологическим и сырьевым условиям и их изменениям. Большинство новых разработок по технологическому содержанию и интеллектуальному уровню реализации не уступают мировым аналогам.

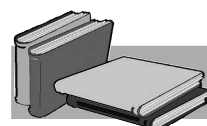
В последние годы актуальность научных разработок ИЧМ только возрастает, поскольку условия, в которых работают металлургические предприятия, довольно резко и непредсказуемо меняются из-за изменения топливно-энергетических условий, разрыва связей с давними партнерами, перестройки логистических схем, смены собственников и изменениями тенденций развития мировой металлургии.



ЛИТЕРАТУРА

1. *Большаков В.И., Тубольцев Л.Г., Врублевский В.В.* Истоки становления научной тематики Института черной металлургии НАН Украины. *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: Сб. науч. тр. ИЧМ.* 2004. Вып. 8. С. 3–23.
2. *Большаков В.И., Тубольцев Л.Г., Муравьева И.Г.* Научно-техническая деятельность ИЧМ в центре металлургии Украины (1952–2004 гг.). *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: Сб. науч. тр. ИЧМ.* 2004. Вып. 8. С. 24–51.
3. *Большаков В.И., Тубольцев Л.Г.* Роль научных исследований в развитии металлургии. *Металлургическая и горнорудная промышленность.* 2005. № 2. С. 1–7.
4. *Большаков В.И., Тубольцев Л.Г., Гринев А.Ф.* Технический уровень и научное сопровождение металлургической отрасли Украины. *Металлургическая и горнорудная промышленность.* 2011. № 2. С. 1–6.
5. *Большаков В.И., Тубольцев Л.Г., Гринев А.Ф.* Научно-техническое сопровождение развития черной металлургии Украины. *Металлургическая и горнорудная промышленность.* 2012. № 6. С. 1–6.
6. *Амоша А.И., Большаков В.И., Залознова Ю.С., Збаразская Л.А., Макогон Ю.В., Минаев А.А., Никифорова В.А., Смирнов А.Н., Тубольцев Л.Г., Хаджинов И.В., Череватский Д.Ю.* Украинская металлургия: современные вызовы и перспективы развития. Монография. – Донецк: Институт экономики промышленности НАН Украины, 2013. 113 с.
7. *Большаков В.И., Тубольцев Л.Г., Гринев А.Ф.* Украинская металлургия: как не зайти в тупик. *Металлы Евразии.* 2011. № 5. С. 3–10.

Поступила 12.09.2019



REFERENCES

1. *Bolshakov, V.I., Tuboltsev, L.G., Vrublevsky, V.V.* (2004). The origins of the formation of scientific topics of the Iron and Steel Institute of the NAS of Ukraine. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy: ISI collection of scientific works.* Iss. 8, pp. 3–23 [in Russian].
2. *Bolshakov, V.I., Tuboltsev, L.G., Muravyova, I.G.* (2004). Scientific and technical activities of the ISI in the center of metallurgy of Ukraine (1952–2004). *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy: ISI collection of scientific works.* Iss. 8, pp. 24–51 [in Russian].
3. *Bolshakov, V.I., Tuboltsev, L.G.* (2005). The role of scientific research in the development of metallurgy. *Metallurgical and mining industry*, no. 2, pp. 1–7 [in Russian].
4. *Bolshakov, V.I., Tuboltsev, L.G., Grinev, A.F.* (2011). Technical level and scientific support of the metallurgical industry of Ukraine. *Metallurgical and mining industry*, no. 2, pp. 1–6 [in Russian].
5. *Bolshakov, V.I., Tuboltsev, L.G., Grinev, A.F.* (2012). Scientific and technical support for the development of ferrous metallurgy in Ukraine. *Metallurgical and mining industry*, no. 6, pp. 1–6 [in Russian].

6. Amosha, A.I., Bolshakov, V.I., Zaliznova, Yu.S., Zbarazskaya, L.A., Makogon, Yu.V., Minaev, A.A., Nikiforova, V.A., Smirnov, A.N., Tuboltsev, L.G., Khadzhinov, I.V., Cherevatsky, D.Yu. (2013). Ukrainian metallurgy: current challenges and development prospects. Monograph. Donetsk, Institute of Industrial Economics of the NAS of Ukraine, 113 p. [in Russian].
7. Bolshakov, V.I., Tuboltsev, L.G., Grinev, A.F. (2011). Ukrainian metallurgy: how not to get into a dead end. *Metals of Eurasia*, no. 5, pp. 3–10 [in Russian].

Received 12.09.2019

Анотація

О.І. Бабаченко, д-р техн. наук, ст. наук. співр., директор,
e-mail: a_babachenko@i.ua, <https://orcid.org/0000-0003-4710-0343>;
О.Є. Меркулов, канд. техн. наук, ст. наук. співр., заст., директора з
наукової роботи, e-mail: office.isi@nas.gov.ua,
<https://orcid.org/0000-0002-7867-0659>; **Л.Г. Тубольцев**, канд. техн. наук,
заслужений працівник промисловості України, зав. відділу,
e-mail: isi.tubol@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9540-3037>

Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України (Дніпро, Україна)

Досвід і перспективи розвитку наукової тематики в Інституті чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України

Наведено історію створення Інституту чорної металургії (ІЧМ). Показано, що створення і становлення Інституту визначалося необхідністю розвитку чорної металургії країни. Інститут об'єднав розрізнені у своїй діяльності групи вчених-металургів, які працювали в різних інститутах країни. Програма робіт ІЧМ, незважаючи на його молодість, була широка і актуальна, що можна пояснити досвідом, ініціативністю і масштабністю діяльності вчених, які очолили відділи Інституту. Наведено витoki створення наукової тематики Інституту, що охоплювала всі основні переділи чорної металургії. Описано наукові розробки, створені співробітниками Інституту вперше в світовій і вітчизняній практиці, які в даний час складають основу світової металургії. Видатними вченими Інституту було створено чимало наукових шкіл, які і сьогодні продовжують вносити неоціненний внесок у розвиток наукової тематики, реалізацію результатів фундаментальних і прикладних досліджень на металургійних підприємствах. Аналіз показує, що стратегічним напрямом розвитку вітчизняної металургії на перспективу є еволюційна зміна металургійних технологій. У зв'язку з цим наведено основні напрями науково-технічного супроводу технологій доменного, сталеплавильного і прокатного виробництва, термічної обробки прокату, що розвиваються в Інституті. Наведено приклади сучасних наукових розробок Інституту. Напрями наукових досліджень Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України охоплюють широке коло проблем виробництва металопродукції, завдяки чому 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 в Україні технологічних і сировинних умов та їх змін. Більшість нових розробок за технологічним змістом і інтелектуальним рівнем реалізації не поступаються світовим аналогам.

Ключові слова

Чорна металургія, технології, наукові школи, науково-технічний супровід металургійних технологій.

Summary

A.I. Babachenko, Dr. Sci. (Engin.), Senior Research Scientist, Director, e-mail: a_babachenko@i.ua, <https://orcid.org/0000-0003-4710-0343>;
A.E. Merkulov, PhD (Engin.), Senior Research Scientist, Director for Research, e-mail: office.isi@nas.gov.ua, <https://orcid.org/0000-0002-7867-0659>;
L.G. Tuboltsev, PhD (Engin.), Honored Worker of Industry of Ukraine, Head of the Department, e-mail: isi.tubol@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9540-3037>

Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov of the NAS of Ukraine (Dnipro, Ukraine)

Experience and prospects for the development of scientific topics at Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov of the NAS of Ukraine

The history of the creation of the Iron and Steel Institute (ISI) is given. It is shown, that the creation and establishment of the Institute was determined by the need to develop the country's ferrous metallurgy. The Institute has united groups of metallurgical scientists, scattered in their activities, who worked in various institutes of the country. The program of the ISI, despite its youth, was wide and relevant, which can be explained by the experience, initiative and scale of the activities of the scientists who headed the departments of the Institute. The origins of the creation of the scientific themes of the Institute, which covered all the major redistribution of the steel industry, are given. The major scientific developments created by the Institute staff for the first time in world and domestic practice, which currently form the basis of world metallurgy, are given. Outstanding scientists of the Institute created quite a few scientific schools, which even today continue to make an invaluable contribution to the development of scientific subjects, the implementation of the results of basic and applied research in metallurgical enterprises. The analysis shows that the strategic direction of development of the domestic metallurgy in the future is an evolutionary change in metallurgical technologies. In this regard, the main areas of scientific and technical support of blast furnace, steelmaking and rolling production, heat treatment of rolled products developed at the Institute are given. Examples of modern scientific developments of the Institute are given.

The research areas of the Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov of the NAS of Ukraine cover the whole range of problems in the production of metal products, due to which they are complex, 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 at the development stage are adapted to the technological and raw material conditions existing in Ukraine and their changes. Most of the new developments in technological content and intellectual level of implementation are not inferior to world analogues.

Keywords

Ferrous metallurgy, technologies, scientific schools, scientific and technical support of metallurgical technologies.

УДК 669.1:005(474)

Л.Г. Тубольцев канд. техн. наук, заслуженный работник промышленности Украины, зав. отделом,
e-mail: isi.tubol@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9540-3037>

А.И. Бабаченко, д-р техн. наук, ст. науч. сотр., директор, e-mail: a_babachenko@i.ua,
<https://orcid.org/0000-0003-4710-0343>

Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины (Днепр, Украина)

Программный подход к развитию черной металлургии Украины в современных условиях

Целью исследования является выявление обобщающего показателя и приоритетных параметров работы сложных промышленных систем, определяющих перспективу их развития. Рассматриваются существующие подходы рейтинговой оценки в многопараметрических задачах. Проведенный анализ показал, что в наибольшей степени для рассматриваемых задач удовлетворяет функция желательности Харрингтона. Приведены результаты анализа производственных показателей работы металлургии (производство стали в мире, Российской Федерации (РФ) и Украине; уровень инвестиций, динамика мировых цен на металлопродукцию). Установлены объективные и субъективные причины нестабильной работы горно-металлургического комплекса Украины (ГМК) в последние годы. К объективным факторам отнесены: мировое производство и потребление стали, мировые цены на металлопродукцию, состояние мировой экономики и мировые финансовые кризисы, надежность мировых валют. К субъективным факторам – производство стали в Украине, показатели экспорта, импорта и внутреннего потребления металлопродукции, эффективность законодательной государственной поддержки металлургии, инвестиционная политика в отрасли, научно-техническая поддержка металлургического производства и ряд других показателей. Предложен обобщенный показатель эффективности работы ГМК, который строится на основе экспертно-математической обработки основных параметров, определяющих работу отрасли. Показано, что использование обобщенного показателя позволяет выполнить прогноз развития отрасли и выявить приоритетные направления ее развития. Использование программного подхода позволяет разработать целевые установки оптимального развития отрасли, в том числе за счет реализации целевых установок наиболее важных параметров ее работы. С учетом минимальных и максимальных значений приведенных критериев установлено, что вероятность достижения запланированных показателей перспективного развития ГМК составляет от 35 до 82 %.

Ключевые слова: многопараметрическая задача, функция желательности Харрингтона, металлургия, анализ, производственные показатели, обобщенный показатель эффективности, прогноз.

Состояние вопроса. Украина традиционно развивала свою черную металлургию и до недавнего времени входила в десятку крупнейших мировых производителей стали. В последние годы отрасль теряет свои позиции как в экономике страны, так и в мире. Динамика производства стали в Украине существенно отличается от мировой – в мире производство стали растет, в Украине стремительно падает (рис. 1).

За приведенными цифрами не видно причин, которые определяют нестабильную работу горно-металлургического комплекса Украины (ГМК). В этой связи актуальность вероятностного анализа перспективы развития металлургии определяется большим значением металлургической отрасли для экономики Украины и необходимостью выявления причин нестабильной ее работы в последние годы. Постараемся заглянуть за кулисы этой проблемы.

Работа ГМК как сложной промышленной системы определяется многочисленными показателями (параметрами), к наиболее важным из которых могут быть отнесены следующие:

- законодательная база, определяющая общие направления работы металлургического комплекса,

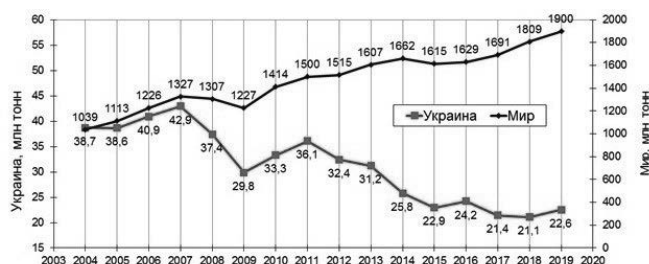


Рис. 1. Динамика производства стали в мире и Украине за 2004–2019 гг.

его роль и значение для экономики страны;

- состояние мировой экономики, которое определяет объемы экспорта металлопродукции и место ГМК в мировой экономике;

- уровень производства металлопродукции в мире и в Украине;

- технический уровень производственной базы предприятий, уровень применения новых технологий, оборудования средств автоматизированного контроля и управления процессами;

- состояние инновационных процессов в ГМК;

- наличие и состояние базы железорудного сырья

и энергоносителей, необходимых для производства металлопродукции;

- экспортные возможности ГМК, его роль в обеспечении потребностей внутреннего рынка страны;
- энергоемкость продукции отрасли;
- научно-технический и кадровый потенциал отрасли и т. д.

Для эффективной работы любой сложной промышленной системы, в том числе и для ГМК, необходимо иметь оптимальные целевые установки. ГМК является многопараметрической системой и поэтому целевые установки должны быть определены для каждого параметра, характеризующего работу отрасли. Наиболее общим показателем эффективности работы системы являются финансовые показатели и прибыль, которые имеют превалирующее значение для приватизированных предприятий. Для базовых отраслей экономики этих показателей недостаточно, поскольку не учитываются общегосударственные, социальные и экологические интересы общества. В этой связи, актуальным является поиск возможности оптимизации работы сложных промышленных систем в изменяющихся внешних и внутренних условиях.

Целью исследования является выявление обобщающего показателя и приоритетных параметров работы сложных промышленных систем, определяющих перспективу их развития.

Для выявления эффективности и перспективы развития сложной производственной системы необходимо выполнить оптимизацию параметров ее работы, что требует многокритериального подхода к решению этой задачи. Почти всякая сложная техническая задача принятия решения многоцелевая, так как при выборе наилучшего варианта приходится учитывать много различных требований, предъявляемых к промышленной системе, и среди этих требований встречаются противоречащие друг другу. Однако, почти все математические методы оптимизации предназначены для нахождения экстремума одной функции, то есть для одной целевой установки. Противоречие целевых установок затрудняет выявление общей эффективности системы и оптимизацию ее работы.

Для решения многокритериальных задач и оптимизации работы сложных производственных систем, в частности металлургического производства, могут быть использованы различные методы построения обобщенного показателя. Одним из наиболее удобных способов построения обобщенного отклика является обобщенная функция желательности Е.К. Харрингтона [1], в основе которой лежит идея преобразования натуральных частных показателей (параметров) рассматриваемой системы в безразмерную шкалу желательности или предпочтительности. При этом на основе экспертных оценок и многочисленных экспериментальных данных в различных отраслях знаний уже разработаны готовые таблицы соответствий между желаемой оценкой и переведенными в безразмерную шкалу значениями частного отклика d_i ($i = 1, 2, \dots, n$), результаты которых, в со-

ответствии с функцией Харрингтона, приведены на рис. 2 [2].

Этот метод возник в результате наблюдений за реальными решениями экспериментаторов и обладает такими полезными свойствами, как непрерывность, монотонность и гладкость. В основе идеи лежит экспертная оценка каждого параметра работы системы по шкале «желательности» и присвоение ему числового значения в диапазоне от 0 до 1. Этот диапазон делится на пять поддиапазонов: $[0; 0,2]$ – «очень плохо», $[0,2; 0,37]$ – «плохо», $[0,37; 0,63]$ – «удовлетворительно», $[0,63; 0,8]$ – «хорошо», $[0,8; 1]$ – «очень хорошо». В принципе число поддиапазонов может быть увеличено или уменьшено, в зависимости от уровня решаемой задачи.



Рис. 2. Общий вид функции Харрингтона с нанесенными интервалами стандартных значений частного отклика по шкале желательности

Функция желательности Харрингтона сочетает в себе методы экспертной оценки и математического аппарата, а также позволяет с достаточной точностью прогнозировать поведение сложных промышленных систем в условиях неопределенности и динамических изменений внешних условий. При этом делается явное или неявное предположение, что вся информация скрыта в формальной модели задачи и, следовательно, с помощью некоторых преобразований может быть из этой формальной модели извлечена и использована для определения оптимального решения.

Методика проведения исследования. За основу математического аппарата пересчета конкретных параметров в абстрактные числовые значения использована одна из логистических функций Е.К. Харрингтона – так называемая «кривая желательности» с формулой $d = \exp[-\exp(-Y)]$, которая имеет два участка насыщения ($d \rightarrow 0$, $d \rightarrow 1$) и линейный участок (от $d = 0,2$ до $d = 0,63$) и выведена эмпирическим путем [3]. Ось координат Y называется шкалой частных показателей, ось d – шкалой желательности. Конкретные параметры сравниваемых систем пересчитываются в отметки на шкале желательности.

Используемая методика сравнения различных

параметров предоставляет некоторые способы универсализации общего подхода к проблеме оценки эффективности существующих и вновь разрабатываемых сложных систем, в том числе и для прогнозирования их поведения в изменяющихся внешних условиях. Вместо простого сравнения параметры систем с использованием экспертного анализа пересчитываются в числовые значения, а затем обрабатываются для получения общего коэффициента системы. Это позволяет более объективно оценивать возможности сложных систем.

Обобщенный показатель (D) эффективности промышленной системы (или коэффициент желательности) вычисляется по формуле:

$$D = \sqrt[n]{d(1) \cdot d(2) \cdot \dots \cdot d(n)}, \quad (1)$$

где n – число используемых показателей параметров сравнения для данной системы; $d(n)$ – числовое значение отклика «желательности» параметра n системы.

Число используемых показателей n может быть неодинаковым для разных систем, и это позволяет «математически» сравнивать обобщенные коэффициенты даже у различных систем или данные по ним. Корень n -й степени «сглаживает» возникающие отклонения, а полученный результат позволяет оценивать системы с определенной степенью точности. Для оценки эффективности влияния каждого параметра на работу системы используется соотношение $d(n)/D$ при различных числовых значениях $d(n)$.

Для прогнозного исследования и для количественной оценки перспектив развития ГМК используем показатель вероятности $W(i) = d(i)$ события A . Этот безразмерный параметр $W(i)$ аналогичен значениям частного отклика $d(i)$ каждого параметра, характеризующего работу сложной промышленной системы, в том числе и горно-металлургического комплекса. В данном исследовании показатель $d(i)$ определялся экспертным путем на основании статистических показателей работы ГМК. В этой связи для прогнозного исследования формула (1) может быть представлена в следующем виде:

$$D = \sqrt[n]{W(1) \cdot W(2) \cdot W(3) \cdot \dots \cdot W(n)}. \quad (2)$$

Основные результаты исследования. Не вдаваясь подробно в механизм обработки каждого параметра работы ГМК, приведем общие принципы и результаты такой обработки. При этом упор сделаем на механизме прогнозных исследований. Анализ по предложенной методике были подвергнуты 7 наиболее важных параметров, характеризующих работу горно-металлургического комплекса как промышленной системы. Эти параметры были разделены на два вида: объективные (неконтролируемые) и субъективные (контролируемые) факторы, учет которых позволяет выявить наиболее оптимальные пути развития промышленной системы, в частности горно-металлургического комплекса Украины. К объективным факторам, влияющим на эффективность

работы ГМК, можно отнести мировое производство и потребление стали, мировые цены на металлопродукцию, состояние мировой экономики и мировые финансовые кризисы, надежность мировых валют. К субъективным факторам, на которые может влиять Украина, можно отнести производство стали в Украине, показатели экспорта, импорта и внутреннего потребления металлопродукции, эффективность законодательной государственной поддержки металлургии, инвестиционная политика в отрасли, научно-техническая поддержка металлургического производства и ряд других показателей.

Прежде всего, следует выявить – определяется ли состояние металлургии объективными или субъективными причинами. Для этого сравним показатели работы металлургии Украины и РФ, поскольку они одновременно проходили этап становления независимости. На рис. 3 представлены индексы производства проката в Украине и РФ. Видно, что до 1994–1995 гг. тенденции падения производства металлопродукции в этих странах полностью совпадали, что определяет влияние объективных факторов перестройки металлургии на рыночные условия.

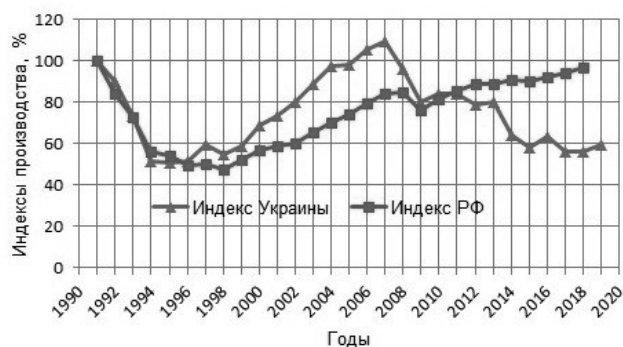


Рис. 3. Индексы производства проката в Украине и РФ по отношению к 1991 г., %

С 1995 г. начинается восстановление производства металлургии как в Украине, так и в РФ. В Украине это восстановление идет более быстрыми темпами вплоть до 2007 г., когда разразился очередной финансовый кризис, что также можно отнести к объективным факторам. К субъективным факторам в период 1995–2007 гг. можно отнести активную роль правительства Украины в развитии металлургии. В этот период было принято несколько законодательных актов, направленных на стабилизацию работы отрасли, и Государственная программа развития металлургии до 2011 г., которая успешно выполнялась. В РФ также работала аналогичная программа развития металлургии при участии правительства. Как в РФ, так и в Украине государство не использовало бюджетных средств для инвестиций в металлургию, использовались кредиты и собственные средства металлургических предприятий.

С 2011 г. динамика производства в Украине и РФ кардинально меняется. В Украине производство металлопродукции стабильно падает, в РФ – растет. Объяснить это явление можно таким субъективным фактором, как инвестиции. Следует отметить, что в

РФ уровень инвестиций с 2000 г. был практически в 2 раза выше, чем в Украине (рис. 4). В отдельные периоды удельные инвестиции в РФ были на уровне зарубежных – около 100 долл/т стали.

Более высоким уровнем инвестиций РФ в металлургию можно объяснить стабильный рост производства стали в РФ с 1998 г. до настоящего времени, несмотря на мировой финансовый кризис 2009 г. Для металлургии Украины мировой финансовый кризис 2009 г. стал фатальным, поскольку с этого периода производство стали резко сократилось и не восстановилось до сих пор (см. рис. 3). При этом экспорт металлопроката ГМК составлял не менее 80 %, и наблюдался импорт металлопродукции, половина сортамента которого производится в Украине. Наиболее благоприятным для развития металлургии в Украине явился период с 1995 по 2007 г., когда в отрасли шла реализация Концепции (1995 г.) и Государственной программы развития металлургии до 2011 г. (2004 г.).

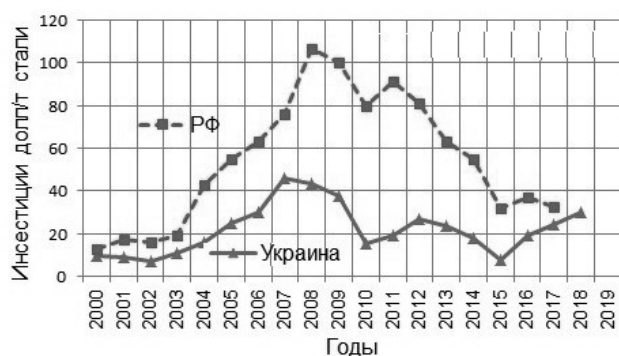


Рис. 4. Удельные инвестиции в металлургию Украины и РФ в 2000–2018 гг.

Перспективы развития такой сложной промышленной системы как горно-металлургический комплекс Украины (ГМК) невозможно определить без применения системного анализа. В то же время системный анализ требует определения многих параметров, от которых зависит описание системы. При проведении данного анализа к информационным параметрам работы ГМК как промышленной системы отнесены следующие.

Производство стали (параметр $W_1 = d_1$). В мире с 2000 г. наблюдается непрерывный рост годового производства стали, причем ежегодное увеличение производства составляет свыше 100 млн т в год. При этом промышленно развитые страны со стабильной экономикой осторожно увеличивают производство, и мировой рост обеспечивается за счет Китая. Учитывая промышленную политику Китая и вывод им из эксплуатации около 50 млн т металлургических мощностей, следует с осторожностью подходить к перспективному росту мирового производства стали. На основе статистических данных нами проведена экспертная оценка вероятности изменения мирового производства стали (соответствует изменению производства стали в Китае) в ближайшие 5 лет (рис. 5). Отмечается, что вероятность сохранения роста

годового производства стали на уровне 10-20 млн т/год может быть осторожно оценена на уровне 50 % (0,5 ед.), а вероятность роста на уровне 120 млн т составляет 30%. В то же время на уровне 100 % следует оценить возможность дальнейшего роста мирового производства стали.

Аналогичная оценка показателя d_1 (вероятность W_1) выполнена для металлургии Украины в условиях работы отрасли с 2011 г. (рис. 6). В этот период производство стали в Украине постоянно сокращалось. Поэтому при анализе работы ГМК следует учитывать, что сегодня производство стали в Украине находится на самом низком уровне за последние 25 лет и необходимо принимать экстренные меры по стабилизации работы отрасли как на государственном уровне, так и на уровне приватизированных металлургических предприятий. В целом оценка вероятности перспективного развития отрасли должна быть всесторонне взвешенной и осторожной.

Влияние государства на работу ГМК (веро-

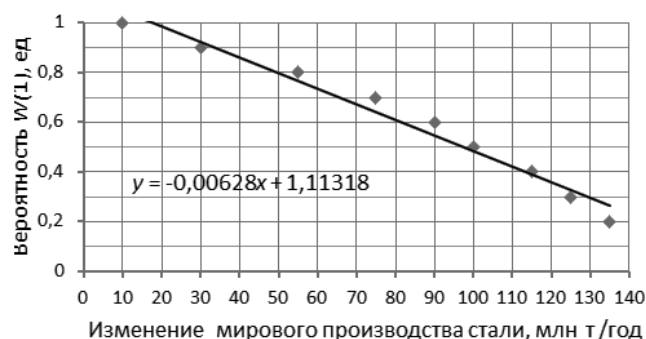


Рис. 5. Вероятность изменения мирового производства (соответствует изменению производства стали в Китае) от уровня производства стали (по данным 2000–2019 гг.)

ятность осуществления государственного влияния на работу отрасли $W_{\text{государства}} = W_2 = d_2$). При любом уровне приватизации металлургической отрасли государство должно сохранять функции управления, осуществлять мониторинг работы отрасли с использованием законодательных форм управления. В истории государственности Украины использовались следующие формы государственного влияния на работу ГМК [4]:

- разработка Концепции развития горно-металлургического комплекса Украины (1992–1995 гг.) и утверждение ее Верховной Радой Украины (1995 г.);



Рис. 6. Вероятность изменения производства стали в Украине (по данным 2011–2019 гг.)

- разработка проекта Национальной программы развития ГМК (1996–1999 гг.);
- принятие Закона Украины «О проведении экономического эксперимента на предприятиях горно-металлургического комплекса Украины» (1999–2000 гг.);
- разработка, утверждение Кабинетом Министров Украины и мониторинг «Государственной программы развития ГМК» до 2011 г.;
- принятие ряда Меморандумов между Кабинетом Министров и ГМК об обеспечении эффективной работы отрасли.

Использование программного подхода к развитию ГМК со стороны государства показало свою эффективность и целесообразность. При этом за все это время бюджетные средства в ГМК не вкладывались. В самые кризисные для металлургии годы отрасли удалось с помощью государства стабилизировать и увеличить производство проката в 1995–2009 гг. (рис. 7). Проведенный анализ показал, что в целом выполнение мероприятий Программы за эти годы имело положительное влияние на развитие ГМК Украины:

- предприятиями ГМК Украины инвестировано в основной капитал более 10 млрд долларов;
- увеличены объемы выплавки кислородно-конвертерной стали с 49,8 до 68,7 %, электростали с 2,8 до 5,9 %, при соответствующем сокращении доли мартеновского производства с 45,3 до 25,4 %;
- увеличены объемы стали, разливаемой на машинах непрерывного литья, с 18 % в начале 90-х годов до 53,5 %;
- достигнуто уменьшение удельных расходов энергоресурсов на производство проката с 1,54 до 1,34 т.у.т./т проката, расход природного газа сократился на 25 %;
- реальный экономический эффект от внедрения результатов работы по модернизации производства, научно-технического и информационного обеспечения Программы составил около 2 млрд долл.

С 2011 г. правительство прекратило взаимодействие с ГМК (за исключением ограничительных мер), что привело к падению производства стали почти на 50 %. Было ликвидировано Министерство промышленной политики Украины, отменены все государственные программы, отказались от разработки долгосрочной Стратегии развития металлургического комплекса [5]. Поэтому вероятность осуществления государственного законодательного влияния на работу ГМК в перспективе может колебаться в широких пределах и может быть оценена на уровне $W_2 = 0,2–0,95$.

Говоря о необходимости усиления роли государства в развитии ГМК, следует отметить, что даже в промышленно развитых странах присутствует влияние государства на металлургию как базовую отрасль экономики. В частности, Президент США Дональд Трамп подписал указ, по которому для реализации инфраструктурных проектов по бюджетным средствам в максимальной степени следует использовать произведенную в США продукцию, что жизненно важно для черной металлургии. Введены ограничения по

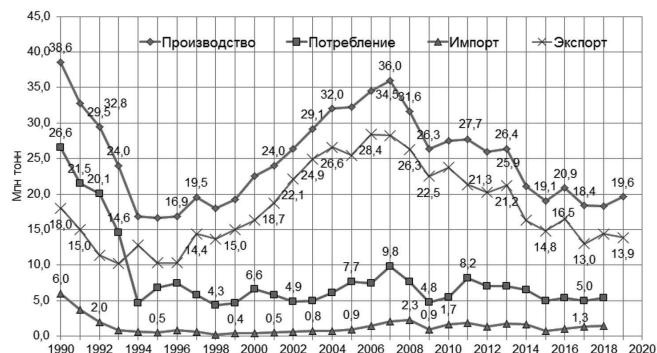


Рис. 7. Баланс производства проката в Украине в период 1990–2019 гг. (производство, экспорт, внутреннее потребление, импорт), млн тонн

приобретению земельных участков и получению разрешений от экологических и других органов.

В РФ на государственном уровне проходит формирование долгосрочной государственной программы по ограничению экспорта сырьевых материалов для возможности перспективного развития производства продукции с высокой добавленной стоимостью и сохранения собственной сырьевой базы на перспективу, формирование стратегического курса на приоритетное обеспечение потребностей внутреннего рынка, введен запрет на вывоз металлолома. Можно привести немало других примеров, но это не входит в задачу данной статьи.

Спрос на металлопродукцию. Развитие ГМК в ближайшее время будет определяться спросом на металлопродукцию на мировых рынках (вероятность $W_3 = d_3$). Для Украины, как поставщика на экспорт металлургических полуфабрикатов, вероятность сохранения такого положения является достаточно высокой ($W_3 = 1,0$), а в направлении производства прогрессивного сортамента металлопродукции W_3 пока не превышает 40–70 %, то есть ($W_3 = 0,4–0,7$) и существенно зависит от промышленной политики государства.

Влияние мировых цен на металлопродукцию. В мире наблюдается постоянное и циклическое (4–6 лет) изменение цен на железорудное сырье, энергоресурсы и металлопродукцию. Зависимость индекса цен на сталь от уровня мирового производства стали приведена на рис. 8. С 1990 г. вероятность изменения мировых цен на металлопродукцию $W_4 = d_4$ в 2–3 раза можно оценить на уровне $W_4 = 0,95–0,98$. Для металлургов это показывает, что необходимо использовать благоприятные моменты на мировых рынках и накапливать ресурсы для прохождения неблагоприятных для развития экономики периодов.

Инфраструктурный показатель работы ГМК $W_5 = d_5$ (наличие трудовых ресурсов высокой квалификации, развитая транспортная инфраструктура, значительные запасы железорудного сырья) еще несколько лет назад свидетельствовал о перспективе отрасли и позволял оценить его вероятность на уровне $W_5 = 1,0$. Однако, уже сегодня в Украине наблюдается дефицит квалифицированных кадров. Еще недавно металлургические предприятия с легкостью сокращали инженерный и производствен-

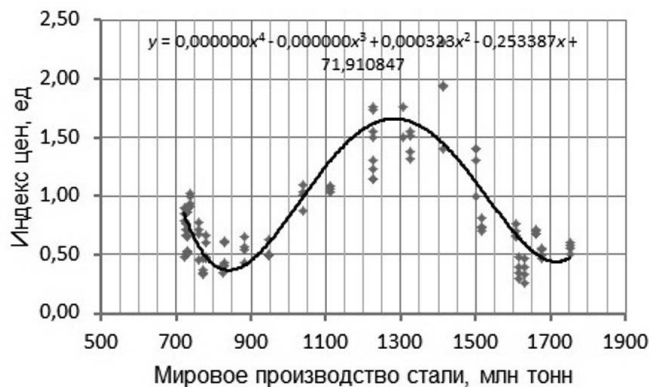


Рис. 8. Зависимость индекса цен на металлопродукцию от уровня мирового производства стали

ный персонал. Сегодня недостаток кадров вырастает в проблему № 1, а вероятность ее успешного решения оценивается на уровне 50 %. Такие же проблемы могут быть в ближайшее время и с другими составляющими инфраструктуры, что еще больше подчеркивает необходимость прямого участия государства в реализации программного подхода к развитию экономики страны и металлургии в частности.

Модернизация ГМК ($W_6 = d_6$). Низкие показатели модернизации отрасли (d_6) не дают оснований оценить вероятность модернизации отрасли более чем $W_6 = 0,5 - 0,7$. Об этом свидетельствуют данные об инвестициях в металлургию Украины и низком уровне влияния инвестиций на производство металлопродукции (см. рис. 4).

Научно-техническое сопровождение ГМК. Для перспективного развития металлургического производства использование научных достижений является обязательным [6], то есть их вероятность W_7 должна равняться $W_7 = 1,0$. Однако для Украины в настоящее время эту вероятность можно оценить на уровне $W_7 = 0,5 - 0,7$.

С учетом минимальных и максимальных значений вышеприведенных критериев можно определить, что вероятность достижения запланированных показателей перспективного развития ГМК составляет:

$$D_{\text{ГМК}} = W_1 \cdot W_2 \cdot W_3 \cdot \dots \cdot W_7 = 0,35 - 0,82.$$

Используя логистическую функцию Харрингтона (см. рис. 2), полученную экспертно-экспериментальным путем, можно перевести абстрактные числовые значения вероятности в качественные показатели. Из них следует, что вероятность достижения запланированных показателей развития ГМК можно оценить как преимущественно «удовлетворительное» в диапазоне значений «плохие – хорошие».

В то же время оценка возможности улучшения эффективности ГМК путем реализации программного подхода к развитию ГМК и использования научно-технического сопровождения металлургических технологий при прочих равных условиях позволит достичь показателей работы ГМК на уровне «хороший» (рис. 9).

Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины всегда выступал сторонником исполь-

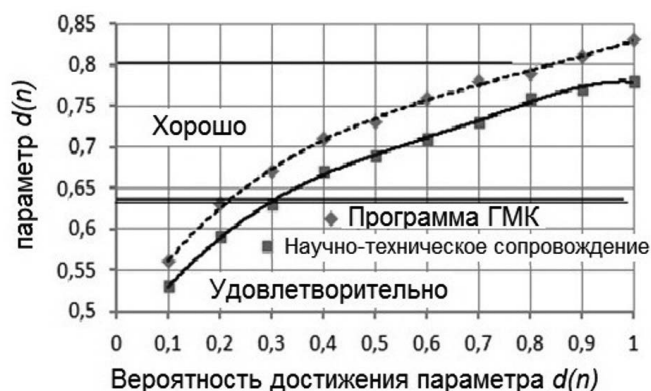


Рис. 9. Возможность улучшения эффективности работы ГМК (параметр $d(n)$) при увеличении вероятности достижения этого параметра при реализации программного подхода и научно-технического сопровождения

зования программного системного подхода к развитию металлургии. Долгосрочная проблематика развития черной металлургии Украины на сегодня включает решение следующих задач:

- обновление производственных мощностей с учетом ограниченных энергоресурсов на сегодня и железорудного сырья на перспективу;
- повышение качества и расширение ассортимента металлопродукции с учетом требований мирового рынка и потребностей экономики Украины на перспективу;
- использование преимуществ сквозных технологий производства металлопродукции для совершенствования структуры передельного металла на базе применения малоотходных технологий;
- освоение новых энергосберегающих технологий производства металлопродукции;
- производство металлопродукции с высокой добавленной стоимостью для реализации на внутреннем и внешнем рынках;
- устранение межотраслевых диспропорций в развитии экономики Украины для оптимального использования и реализации металлопродукции;
- учет влияния экологических факторов и мероприятий по защите окружающей среды на перспективное развитие черной металлургии Украины.

Выводы

Проведенный анализ металлургического производства и данных экспертного опроса представителей ряда металлургических компаний дает возможность оценить состояние отечественного металлургического сектора и ожидания относительно перспектив развития отрасли в целом. Современное состояние металлургической отрасли Украины может быть оценено как положительное (20 %), скорее как положительное (63 %), отрицательное (17 %). Прогнозные ожидания на улучшение состояния металлургической отрасли составляют около 55 %, ожидания на стабильность ситуации составляют около 40 %, ожидания ухудшения ситуации составляют около 5 %.

В то же время, значительные материальные и

энергетические расходы и экологические проблемы производства определяют существенные проблемы как для состояния, так и для перспектив развития металлургической отрасли в целом.

К перечню основных современных проблем металлургической отрасли можно отнести следующие:

- несовершенство государственного регулирования отрасли (административные, торговые, экономические рычаги и т. д.) – 50 %;

- недостаточный объем мощностей и производственно-технического потенциала, недостаточный технический уровень металлургических технологий – 40 %;

- коррупция – 10 %.

Можно отметить, что на металлургических предприятиях преобладают такие виды инноваций:

- технологические инновации, в виде внедрения товара или услуги, которые являются новыми или значительно улучшенными (сюда входит совершенствование технических характеристик, компонентов и материалов, программно-аппаратных средств, повышение удобства использования оборудования и др.);

- внедрение нового или значительно улучшенного способа производства или доставки продукта (сюда входят значительные изменения в технологии, про-

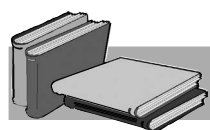
изводственном оборудовании и/или программном обеспечении);

- внедрение нового организационного метода в деловой практике предприятия, организации рабочих мест или внешних связей;

- внедрение нового маркетингового метода, включая значительные изменения в дизайне или упаковке продукта, его размещении, продвижении на рынок или в установлении цены.

К актуальным проблемам развития металлургической отрасли можно отнести, прежде всего, вопросы технической политики, разработку стратегии развития отрасли, анализ тенденций развития мировой металлургии, вопросы энергосбережения и улучшения экологической ситуации.

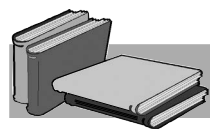
Таким образом, разработка на государственном уровне долгосрочной Стратегии развития горно-металлургического комплекса является необходимым условием реализации программного подхода к развитию металлургии как базовой отрасли экономики страны. Вероятность развития ГМК Украины определяется задачами на государственном уровне. Если государство не считает развитие ГМК приоритетным, то вероятность развития комплекса определяется только позицией его владельцев.



ЛИТЕРАТУРА

1. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976. 280 с.
2. Ендовицкий Д.А., Любушин Н.П., Бабичева Н.Э. Ресурсоориентированный экономический анализ: теория, методология, практика. Экономический анализ: теория и практика. 2013. № 38. С. 2–8.
3. Безбородова Т.И. Использование функции Харрингтона при рейтинговой оценке деятельности организации в условиях антикризисного управления. Финансовая аналитика: проблемы и решения. 2014. № 1. С. 24.
4. Грищенко С.Г., Гринев А.Ф., Тубольцев Л.Г. Проблемные вопросы развития горно-металлургического комплекса Украины. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2017. № 1. С. 2–6.
5. Большаков В.И., Тубольцев Л.Г. Нужна ли Украине стратегия развития черной металлургии? «Зеркало недели. Украина» № 21, 12 июня 2015. URL: https://zn.ua/energy_market/nuzhna-li-ukraine-strategiya-razvitiya-chernoy-metallurgii-_.html
6. Babachenko A.I., Tuboltsev L.G. Iron and steel Institute of the NAS of Ukraine. Scientific and technical support of black metallurgy. *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: Сб. науч. тр. Дніпро: ІЧМ НАН України*. 2017. Вып. 31. С. 3–9.

Поступила 25.09.2019



REFERENCES

1. Adler, Yu.P., Markova, E.V., Granovsky, Yu.V. (1976). Planning an experiment to find optimal conditions. Moscow: Nauka, 280 p. [in Russian].
2. Endovitsky, D.A., Lyubushin, N.P., Babicheva, N.E. (2013). Resource-oriented economic analysis: theory, methodology, practice. *Economic analysis: theory and practice*, no. 38, pp. 2–8 [in Russian].

3. Bezborodova, T.I. (2014). Using the Harrington function in the rating assessment of the organization's activities under crisis management. *Financial analytics: problems and solutions*, no. 1, P. 24 [in Russian].
4. Grishchenko, S.G., Grinev, A.F., Tuboltsev, L.G. (2017). Problematic issues of the development of the mining and metallurgical complex of Ukraine. *Metallurgical and mining industry*, no. 1, pp. 2–6 [in Russian].
5. Bolshakov, V.I., Tuboltsev, L.G. (2015). Does Ukraine need a development strategy for ferrous metallurgy? "Mirror of the week. Ukraine", no. 21, June 12, 2015. URL: https://zn.ua/energy_market/nuzhna-li-ukraine-strategiya-razvitiya-chernoy-metallurgii-.html [in Russian].
6. Babachenko, A.I., Tuboltsev, L.G. (2017). Iron and steel Institute of the NAS of Ukraine. Scientific and technical support of black metallurgy. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy: Collection of scientific works*, Dnipro: ISI of the NAS of Ukraine, iss. 31, pp. 3–9 [in English].

Received 25.05.2019

Анотація

Л.Г. Тубольцев, канд. техн. наук, заслужений працівник промисловості України, зав. відділу, e-mail: isi.tubol@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9540-3037>; **О.І. Бабаченко**, д-р техн. наук, ст. наук. співр., директор, e-mail: a_babachenko@i.ua, <https://orcid.org/0000-0003-4710-0343>

Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України (Дніпро, Україна)

Програмний підхід до розвитку чорної металургії України в сучасних умовах

Метою дослідження є виявлення узагальнюючого показника та пріоритетних параметрів роботи складних промислових систем, що визначають перспективу їхнього розвитку. Розглядаються існуючі підходи рейтингового оцінювання у багатопараметричних завданнях. Проведений аналіз показав, що найбільшою мірою для розглянутих завдань задовольняє функція бажаності Харрінгтона. Наведено результати аналізу виробничих показників роботи металургії (виробництво сталі у світі, Російській Федерації (РФ) та Україні; рівень інвестицій, динаміка світових цін на металопродукцію). Встановлено об'єктивні і суб'єктивні причини нестабільної роботи гірничо-металургійного комплексу України (ГМК) в останні роки. До об'єктивних факторів віднесено: світове виробництво і споживання сталі, світові ціни на металопродукцію, стан світової економіки і світові фінансові кризи, надійність світових валют. До суб'єктивних факторів – виробництво сталі в Україні, показники експорту, імпорту та внутрішнього споживання металопродукції, ефективність законодавчої державної підтримки металургії, інвестиційна політика в галузі, науково-технічна підтримка металургійного виробництва та ряд інших показників. Запропоновано узагальнений показник ефективності роботи ГМК, що будується на основі експертно-математичної обробки основних параметрів, що визначають роботу галузі. Показано, що використання узагальненого показника ефективності роботи дозволяє виконати прогноз розвитку галузі та виявити пріоритетні напрямки її розвитку. Використання програмного підходу дає змогу розробити цільові установки оптимального розвитку галузі, у тому числі за рахунок реалізації цільових установок найбільш важливих параметрів її роботи. З урахуванням мінімальних і максимальних значень наведених критеріїв встановлено, що ймовірність досягнення запланованих показників перспективного розвитку ГМК становить від 35 до 82 %.

Ключові слова

Багатопараметричне завдання, функція бажаності Харрінгтона, металургія, аналіз, виробничі показники, узагальнений показник ефективності, прогноз.

Summary

L.G. Tuboltsev, PhD (Engin.), Honored Worker of Industry of Ukraine, Head of the Department, e-mail: isi.tubol@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9540-3037>; **A.I. Babachenko**, Dr. Sci. (Engin.), Senior Research Scientist, Director, e-mail: a_babachenko@i.ua, <https://orcid.org/0000-0003-4710-0343>

Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov of the NAS of Ukraine (Dnipro, Ukraine)

Program approach to the development of ferrous metallurgy in Ukraine in modern conditions

The aim of the study is to identify a general indicator and priority parameters of complex industrial systems that determine the prospects for their development. Existing rating assessment approaches in multi-parameter problems are considered. The analysis showed that Harrington's desirability function is satisfied to the greatest extent for the problems under consideration. The results of the analysis of production indicators of metallurgy (steel production in the world, the Russian Federation (RF) and Ukraine; the level of investment, the dynamics of world prices for metal products) are presented. Objective and subjective reasons for the unstable operation of the industry in recent years are established. Objective factors include world steel production and consumption, world steel product prices, the state of the world economy and global financial crises, and the reliability of world currencies. Subjective factors include steel production in Ukraine, indicators of export, import and domestic consumption of metal products, the effectiveness of legislative state support for metallurgy, investment policy in the industry, scientific and technical support for metallurgical production, and a number of other indicators. A generalized indicator of the efficiency of the mining and metallurgical complex of Ukraine is proposed, which is based on expert-mathematical processing of the main parameters that determine the industry. It is shown that the use of a generalized performance indicator allows us to fulfill the forecast for the development of the industry and identify priority areas for its development. Using a software approach allows you to develop target settings for the optimal development of the industry, including due to the implementation of target settings of the most important parameters of its work. Taking into account the minimum and maximum values of the above criteria, it was found that the probability of achieving the planned indicators of the prospective development of the mining and metallurgy sector is from 35 to 82 %.

Keywords

Multi-parameter task, Harrington's desirability function, metallurgy, analysis, production indicators, generalized efficiency indicator, prognosis.

С.И. Семькин, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., e-mail: isisemykin@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7365-2259>

Т.С. Голуб, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., e-mail: dove@email.ua, <https://orcid.org/0000-0001-9269-2953>

С.А. Дудченко, науч. сотр., e-mail: s.dudchenko@meta.ua, <https://orcid.org/0000-0002-7319-9896>

В.В. Вакульчук, мл. науч. сотр., e-mail: vvvakulchuk@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7887-284>

Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины (Днепр, Украина)

Высокотемпературное исследование особенностей продувки металлической ванны в LD конвертере через кольцевое коаксиальное сопло

Процесс взаимодействия высокоскоростной газовой струи окислителя, истекающей из верхней продувочной фурмы, при кислородном LD конвертировании с расплавом является определяющим и решающим фактором развития и протекания тепловых и обменных процессов. В работе представлены результаты высокотемпературного исследования характера и особенностей продувки металлического расплава через верхнюю фурму с кольцевым коаксиальным соплом на базе 60-кг лабораторного конвертера в сопоставлении с работой четырехсопловой наконечника. На базе непрерывной видеозаписи скоростной камерой с частотой 300 кадров в секунду и регистрации технологических показателей изучен характер взаимодействия кислородной струи с жидкой ванной и подтверждены полученные на этапе «холодного» моделирования выводы о более высоком динамическом напоре и глубоком проникновении в расплав струи при применении опытного наконечника. Выявлено более раннее зажигание плавки и значительное повышение уровня температуры подфурменной области, зарегистрированной пирометром, вероятно, за счет создания в подфурменной области зоны интенсивного дожигания CO до CO₂. Однако глубокое проникновение струи обусловило более жесткий характер продувки с формированием меньшего количества шлака, вероятно, за счет меньшего поступления окислов железа в шлак, чем на сравнительных плавках. По величине снижения уровня углерода в расплаве в сопоставлении со сравнительными плавками при сопоставимом уровне количества поданного кислорода установлено увеличение доли кислорода, расходуемого на окисление углерода при применении опытного наконечника, с соответствующим повышением скорости окисления углерода по ходу продувки.

Ключевые слова: Кислородно-конвертерный процесс, высокотемпературное моделирование, верхняя кислородная фурма, кольцевое коаксиальное сопло.

В кислородно-конвертерной ванне протекает сложный комплекс явлений, среди которых процесс взаимодействия газовой струи окислителя с расплавом является первичным и определяющим фактором в прохождении физико-химических и тепло-массообменных процессов при плавке [1–3].

Совершенствование дутьевых режимов является одним из высокоэффективных энерго- и ресурсосберегающих направлений, позволяющих достаточно быстро и без значительных финансовых затрат существенно улучшить технико-экономические показатели производства конвертерной стали. Однако на сегодняшний день вопросу эффективности усвоения кислорода металлическим расплавом на протекание основных окислительных реакций из его общего ко-

личества, подаваемого на плавку, не уделяют должного внимания [4].

Физическое моделирование продувки через кольцевой коаксиальный сопловой наконечник (способствующий снижению рассеивания потока [5]) при применении его с верхней кислородной фурмой выявило, что истекающая из него струя газа по оси распространения обладает большим, по сравнению с одним цилиндрическим соплом, динамическим напором, в результате чего глубже проникает в жидкость [6].

Цель данной работы – высокотемпературное исследование особенностей продувки железоуглеродистого расплава с использованием кольцевого коаксиального сопла.

Методика проведення високотемпературних експериментів. Опитування були проведені в умовах лабораторного участка Дніпровського державного технічного університету (ДГТУ) на 100-кг моделі кислородного конвертера [7–8], изготовленого в масштабі 1:30 к промисловому 160-т конвертеру. В модель заливали порядком 60 кг чугуна з температурою 1360–1400 °С і продували технічно чистим киснем (чистотою порядком 99,5 %) до «падіння» факела порядком 12 хвилин. По ходу продувки присаживали по 1,2 кг вапниці і 0,06 кг шпату на першій, третій і п'ятій хвилинах. В течение продувки кожні три хвилини виробляли відбір проб металу.

Опытні продувки здійснювали при використанні наконечника фурми з кільцевим коаксимальним щелевим соплом, сформованим внутрішнім діаметром вставки $6 \cdot 10^{-3}$ м і зовнішнім діаметром прутка, закріпленого всередині соплового наконечника, – $5 \cdot 10^{-3}$ м (даліше опытний наконечник). Сравнительні продувки були проведені з використанням чотирьохсоплового наконечника (діаметр сопла – $1,7 \cdot 10^{-3}$ м, кут нахилу сопел к вертикальній осі фурми – 14°) (даліше сравнительний наконечник). Сечення опытного сопла і сравнительного вибрані рівновеликими, виходячи з подобию промисловому конвертеру з 4-х сопловим наконечником, з діаметром сопел Лавалля $40 \cdot 10^{-3}$ м кожне. Опытні і сравнительні плавки були проведені в сопоставимих технологічних умовах. В течение всієї продувки вироблялася відеозапис підфурменної реакційної області ванни через смотрові вікна моделі з допомогою швидкісної відеокамери CASIO EXILIM EX F1 і реєстрація рівня світимості підфурменної зони пірометром Benetech GM2200 (характеризувала ступінь розігріву сталеплавильної ванни).

Результати експериментів і їх обговорення. Сопоставительний аналіз відео отриманих матеріалів виявив газодинамічні відмінності в характері взаємодії струї з поверхнею розплаву, особливо явно помітні в початку продувки плавки, коли ще не сформована шлакова емульсія. Так, на етапі до запалювання плавки в разі застосування опытного наконечника в підфурменній області формуються кільцеві зони вдернення струї в залізо-углеродистий розплав (рис. 1), подібні виявленим при проведенні холодного моделювання з використанням рідинної середовища [6]. В разі застосування сравнительного наконечника було помічено формування чотирьох зон вдернення від кожної з струй, що характерно для роботи даного типу наконечників [9–10]. Також було помічено, що при застосуванні опытного наконечника запалювання продувки наступало швидше і становило порядком 8–15 секунд проти 12–25 секунд в разі застосування сравнительного наконечника. Це, по-видимому, пов'язано з більшим рівнем динамічного напора, створюваного струєю, істекаючої з опытного соплового наконечника.

Також помічено, що продувка з застосуванням опытного соплового наконечника, по візуальній оцінці, відзначалася більшим періодом часу без «задимлення» факела.

Однак слід відзначити, що на плавках з застосуванням опытного наконечника було сформовано значно менше, ніж на сравнительних плавках, кількість шлаку, і спостерігався низький рівень підйому ванни в аналогічні періоди продувки. Це пов'язано з відзначеним візуально більш «жестким» характером продувки на опытних плавках, відзначаючись більш високим динамічним напором струї з більш глибоким рівнем проникнення її в

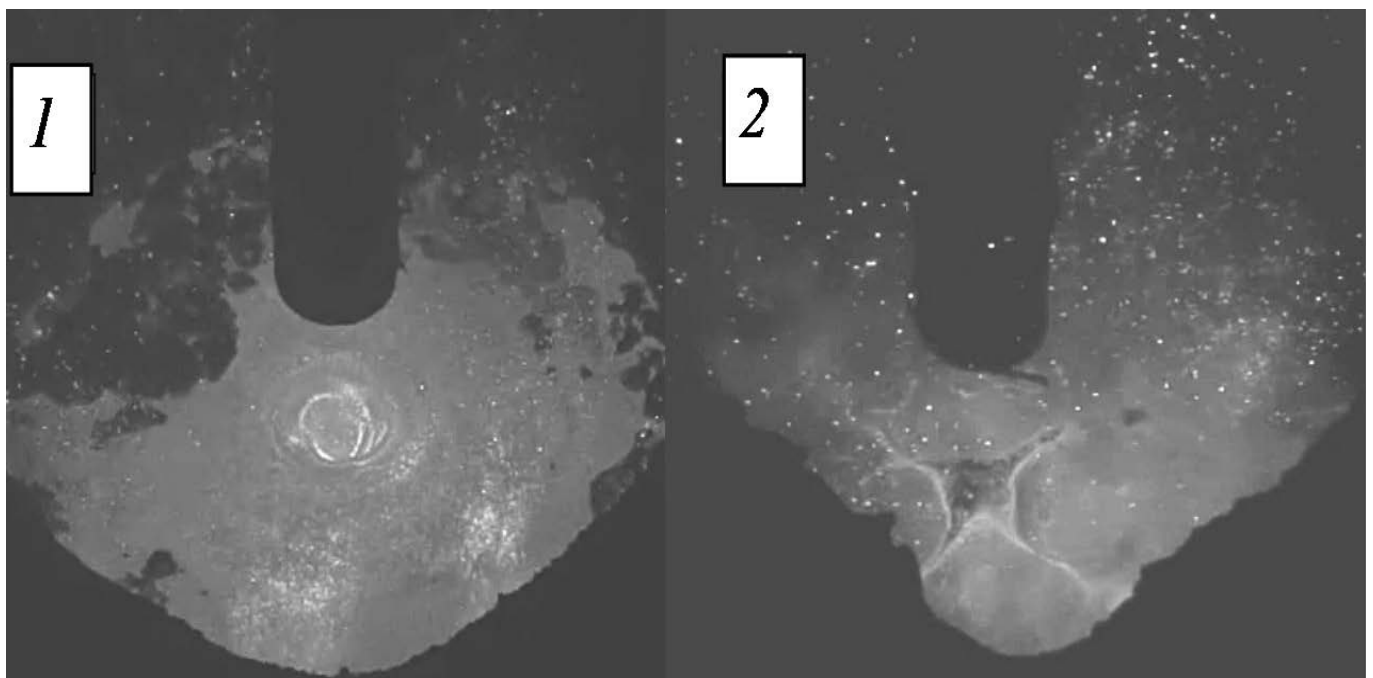


Рис. 1. Фрагмент відеозапису початку продувки через фурму з опытним наконечником – 1, і сравнительним наконечником – 2

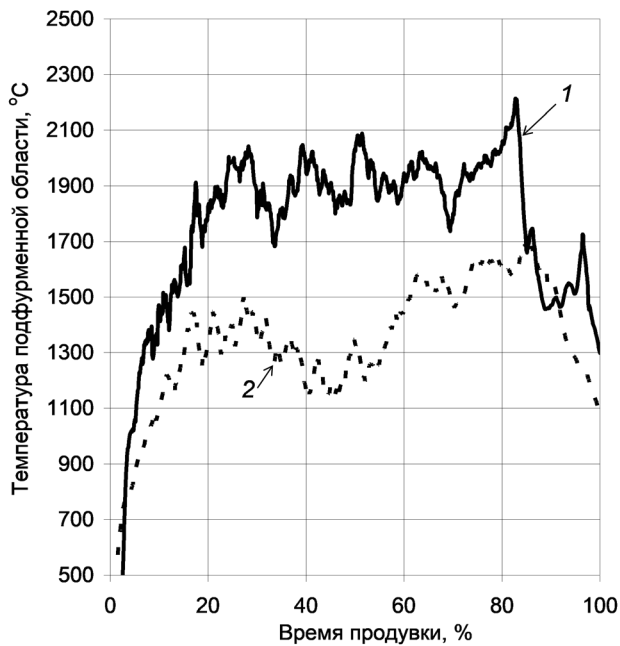


Рис. 2. Изменение уровня светимости подфурменной области по ходу продувки с применением: опытного наконечника (1) и сравнительного наконечника (2); для сопоставления продувок, имеющих различную длительность, время продувки выражено в относительных процентах

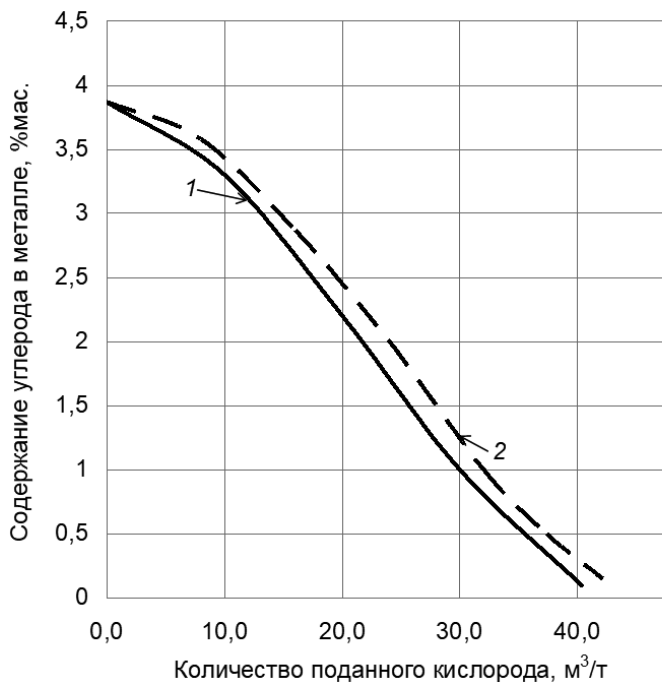
жидкость, выявленных на этапе исследования работы щелевого сопла на «холодной» модели.

Анализ изменения зарегистрированной пирометром температуры подфурменной области (рис. 2), качественно характеризующей разогрев ванны, подтверждает отмеченное визуально более раннее «зажигание» продувки в случае применения щелевого

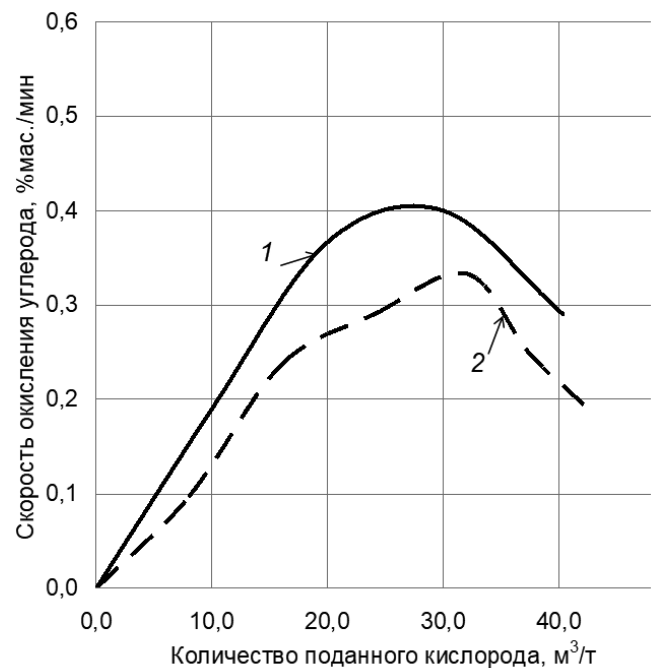
коаксиального сопла, что отразилось в зарегистрированном, практически с первых секунд плавки, ростом показаний температуры.

Так, в начальный период продувки температура в подфурменной области в варианте применения опытного наконечника была больше на 300–400 °С, по сравнению с продувкой через сравнительный наконечник, а в основной период продувки – на величину порядка 500 °С. При этом отмечено, что продувка через опытный наконечник отличалась максимальной степенью разогрева подфурменной области до температур порядка 1900–2000 °С в течение практически всей длительности продувки плавки. Вероятно, более глубокое проникновение струи в расплав способствовало созданию в подфурменной области зоны интенсивного дожигания СО до СО₂, что и обеспечило активный разогрев подфурменной области, учитывая, что уровень содержания основных компонентов – теплоносителей на опытных продувках был на сопоставимом уровне со сравнительными продувками и, следовательно, не мог быть источником дополнительного прироста тепла.

Сопоставление и анализ изменения уровня содержания углерода в металле и скорости окисления углерода по ходу продувки плавки от количества поданного в течение продувки кислорода выявили классический характер зависимостей для анализируемых сопловых наконечников с существенным увеличением расхода кислорода при низком содержании углерода в металле (рис. 3) [11]. При этом отмечено, что в случае применения опытного наконечника содержание углерода в металле при одном и том же количестве поданного на продувку кислорода ниже, чем в варианте применения сравнительного наконеч-



а



б

Рис. 3. Зависимость содержания углерода в металле (а) и скорости окисления углерода (б) по ходу продувки от количества поданного в течение продувки кислорода при применении: опытного наконечника (1), и сравнительного наконечника (2)

ника, что свидетельствует о большей степени усвоения кислорода ванной на протекание «основных» для конвертирования реакций окисления углерода, вероятно, за счет глубокого проникновения струи в расплав (см. рис. 3, а).

Подтверждением этому также являются результаты анализа изменения скорости окисления углерода (см. рис. 3, б): применение опытного наконечника способствует повышению скорости окисления углерода уже с начала продувки на 10–25 % с поддержанием ее на более высоком уровне в среднем на 20–30 % далее в течение продувки.

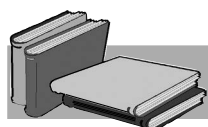
Выводы

Таким образом, проведенное высокотемпературное моделирование взаимодействия кислородной струи, истекающей из кольцевого коаксиального сопла, с металлическим расплавом, подтвердило полученные на этапе «холодного» моделирования ре-

зультаты о более высоком уровне ее динамического напора и глубоком проникновении ее в расплав. Отмечены визуальные различия в поведении ванны по ходу продувки в случае применения опытного наконечника: формирования кольцевой зоны внедрения, раннее зажигание плавки и визуально более жесткий характер продувки с формированием меньшего количества шлака.

Выявлено, что применение опытного наконечника способствует повышению теплового уровня подфурменной области, что косвенно свидетельствует о большем, чем на сравнительных плавках, разогреве ванны, вероятно, за счет более активного дожигания формируемого в ходе продувки CO до CO₂.

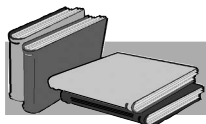
Анализ изменения содержания углерода и скорости его окисления по ходу продувки плавки выявил увеличение доли кислорода, расходуемого на окисление углерода при применении опытного наконечника, с соответствующим повышением скорости окисления углерода по ходу продувки.



ЛИТЕРАТУРА

1. Vaclav Smil. Transforming the twentieth century: technical innovations and their consequences. Volume 2. Oxford University Press US. ISBN 0-19-516875-5. 2006. 368 p.
2. Toshihiko Emi. Steelmaking Technology for the Last 100 Years: Toward Highly Efficient Mass Production Systems for High Quality Steels. ISIJ Int. 2015. Vol. 55. Iss. 1. P. 36–66.
3. Сущенко А.В. Совершенствование и оптимизация дутьевых режимов и устройств кислородных конвертеров. *Вісник Приазовського державного технічного університету*. 2009. Вип. 19. С. 36–40.
4. Лухтура Ф.И. О степени усвоения кислорода металлической ванной при верхнем вдуве в LD-конвертере. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Технічні науки*. 2018. Вип. 36. С. 39–53.
5. Verma S.B., Stark R., Nuerenberger-Genin C., Haidn O. Coldgas experiments to study the flow separation characteristics of a dual-bell nozzle during its transition modes. *Shock Waves*. 2010. Vol. 20. Iss. 3. P. 191–203.
6. Голуб Т.С., Дудченко С.А., Вакульчук В.В. Изучение на физической модели особенностей продувки сверху через коаксиальное сопло. Материалы Международной научно-технической конференции «Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии», Могилев, 26–27 апреля 2018. С. 121–122.
7. Чернятевич А.Г. Высокотемпературное моделирование кислородно-конвертерного процесса. *Известия ВУЗов. Черная металлургия*. 1991. № 12. С. 16–18.
8. Протопопов Е.В., Фейлер С.В. Теория и технология высокотемпературного моделирования конвертерных процессов. *Вестник РАН (ЗСО): ЭБ*. 2016. № 18. С. 93–105.
9. Чернятевич А.Г. Разработка дутьевого и шлакового режимов конвертерной плавки при верхней кислородной продувке. Сообщение 1. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2015. № 4. С. 24–31.
10. Чернятевич А.Г. Разработка дутьевого и шлакового режимов конвертерной плавки при верхней кислородной продувке. Сообщение 2. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2015. № 5. С. 10–18.
11. Бойченко Б.М., Охотский В.Б., Харлашин П.С. Конвертерное производство стали: теория, технология, качество стали, конструкции агрегатов, рециркуляция материалов и экология. Днепропетровск: Днепр-ВАЛ, 2006. 454 с.

Поступила 13.09.2019



REFERENCES

1. Vaclav Smil (2006). Transforming the twentieth century: technical innovations and their consequences, Volume 2. Oxford University Press US, ISBN 0-19-516875-5, 368 p. [in English].
2. Toshihiko Emi (2015). Steelmaking Technology for the Last 100 Years: Toward Highly Efficient Mass Production Systems for High Quality Steels. ISIJ Int. Vol. 55. Iss.1, pp. 36–66 [in English].
3. Sushenko, A. V. (2009). Improvement and optimization of blow modes and devices of oxygen converters. *Vistnyk Pryazovs'kogo tehnichnogo universytetu*, vol. 19, pp. 36–40 [in Russian].
4. Lukhtura, F.I. (2018). About the degree of assimilation of oxygen in a metal bath with top blowing in an LD converter. *Vistnyk Pryazovs'kogo tehnichnogo universytetu*, vol. 36, pp. 39–53 [in Russian].
5. Verma, S.B., Stark, R., Nuereberger-Genin, C., Haidn, O. (2010). Cold-gas experiments to study the flow separation characteristics of a dual-bell nozzle during its transition modes. *Shock Waves*, vol. 20, iss. 3, pp. 191–203 [in English].
6. Holub, T.S., Dudchenko, S.A., Vakul'chuk, V.V. (2018). Study on a physical model of the features of top blowing through a coaxial nozzle. *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Materialy, oborudovanie i resursosberegachshie tekhnologii"*, Mogilev, 26–27 aprelia 2018. Materials of the International scientific and technical conference "Materials, equipment and resource-saving technologies", Mogilev, April 26–27, 2018, pp. 121–122 [in Russian].
7. Cherniatevich, A.G. (1991). High-temperature modeling of the oxygen-converter process. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya. Izvestiya. Ferrous Metallurgy*, vol. 12, pp. 16–18 [in Russian].
8. Protopopov, Ye.V., Feiler, S.V. (2016). Theory and technology of high-temperature modeling of converter processes. *Vestnik RAEN. Bulletin of the Russian Academy of Natural Sciences*, vol. 18, pp. 93–105 [in Russian].
9. Cherniatevich, A.G. (2015). Development of blowing and slag modes of converter smelting with top oxygen blowing. Report 1. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'. Metallurgical and Mining Industry*, vol. 4, pp. 24–31 [in Russian].
10. Cherniatevich, A.G. (2015). Development of blowing and slag modes of converter smelting with top oxygen blowing. Report 2. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'. Metallurgical and Mining Industry*, vol. 5, pp. 10–18 [in Russian].
11. Boychenko, B.M., Okhotskiy, V.B., Harlashin, P.S. (2006). Converter steel production: theory, technology, steel quality, unit designs, material recycling and ecology. Dnepropetrovsk: Dnepr-VAL, 454 p. [in Russian].

Received 13.09.2019

Анотація

С.І. Семикін, канд. техн. наук, ст. наук. співр., e-mail: isisemykin@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7365-2259>; **Т.С. Голуб**, канд. техн. наук, ст. наук. співр., e-mail: dove@email.ua, <https://orcid.org/0000-0001-9269-2953>; **С.О. Дудченко**, наук. співр., e-mail: s.dudchenko@meta.ua, <https://orcid.org/0000-0002-7319-9896>; **В.В. Вакульчук**, мол. наук. співр., e-mail: vvvakulchuk@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7887-284>

Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України (Дніпро, Україна)

Високотемпературне дослідження особливостей продувки металеві ванни в LD конвертері через кільцеве коаксіальне сопло

Процес взаємодії високошвидкісного газового струменя окислювача, що витікає з верхньої продувної фурми, при кисневому LD конвертуванні з розплавом є визначальним і вирішальним фактором розвитку і протікання теплових та обмінних процесів. В роботі представлено результати високотемпературного дослідження характеру й особливостей продувки металевого розплаву через верхню фурму з кільцевим коаксіальним соплом на базі 60-кг лабораторного конвертера в зіставленні з роботою чотирьохсоплового наконечника. На базі безперервного відеозапису швидкісною камерою з частотою 300 кадрів в секунду та реєстрації технологічних показників вивчено характер взаємодії кисневого струменя з рідкою ванною й підтверджено отримані на етапі «холодного» моделювання висновки про більш високий рівень динамічного натиску і глибоке проникнення в розплав струменя при застосуванні дослідного наконечника.

Виявлено більш раннє запалення плавки і значне підвищення рівня температури підфурменної області, зареєстрованої пірометром, ймовірно, за рахунок створення в підфурменній області зони інтенсивного допалювання CO до CO₂. Однак глибоке проникнення струменя зумовило більш жорсткий характер продувки з формуванням меншої кількості шлаку, ймовірно, за рахунок меншого надходження оксидів заліза в шлак, ніж на порівняльних плавках. За величиною зниження рівня вуглецю в розплаві в зіставленні з порівняльними плавками при порівнянній кількості поданого кисню встановлено збільшення частки кисню, що витрачається на окислення вуглецю при використанні дослідного наконечника, з відповідним підвищенням швидкості окислення вуглецю за ходом продувки.

Ключові слова

Киснево-конвертерний процес, високотемпературне моделювання, верхня киснева фурма, кільцеве коаксіальне сопло.

Summary

S.I. Semykin, PhD (Engin.), Senior Researcher, e-mail: isisemykin@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7365-2259>; **T.S. Golub**, PhD (Engin.), Senior Researcher, e-mail: dove@email.ua, <https://orcid.org/0000-0001-9269-2953>; **S.A. Dudchenko**, Researcher, e-mail: s.dudchenko@meta.ua, <https://orcid.org/0000-0002-7319-9896>; **V.V. Vakulchuk**, Junior Researcher, e-mail: vvvakulchuk@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7887-284>

Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov of the NAS of Ukraine (Dnipro, Ukraine)

High-temperature study of features of blowing a metal bath in LD converter through the annular coaxial nozzle

The process of interaction of a high-speed gas stream of an oxidizing agent flowing from the top blowing lance during oxygen LD conversion with melt is a determining and decisive factor in the development and occurrence of thermal and exchange processes. The paper presents the results of a high-temperature study of the nature and characteristics of blowing a metal melt through the top lance with an annular coaxial nozzle based on a 60-kg laboratory converter in comparison with the work of four nozzle tips. On the basis of continuous video recording by a high-speed camera with a frequency of 300 frames per second and recording of technological indicators, the nature of the interaction of an oxygen jet with a liquid bath was studied and the conclusions obtained at the "cold" modeling about higher dynamic pressure and deep penetration into the melt of the jet using an experienced tip were confirmed. Earlier ignition of the melting and a significant increase in the temperature of the substance area recorded by the pyrometer were revealed, probably due to the creation of a zone of intense postcombustion of CO to CO₂ in the sub-lance region. However, the deep penetration of the jet led to a more stringent blowing with the formation of a smaller amount of slag, probably due to a smaller intake of iron oxides in the slag than in comparative heat. According to the magnitude of the decrease in the level of carbon in the melt compared to comparative melts at the same level of the amount of oxygen supplied, an increase in the proportion of oxygen spent on carbon oxidation using an experimental tip was found, with a corresponding increase in the rate of carbon oxidation during the blowing.

Keywords

Oxygen-converter process, high-temperature modeling, top oxygen lance, annular coaxial nozzle.

Д.Н. Тогобицкая, д-р техн. наук, проф., зав. отделом, e-mail: dntog@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-6413-4823>

А.И. Белькова, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., e-mail: alla2904b8@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8519-9351>

Д.А. Степаненко, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., e-mail: d.gorodenskiy@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0184-8295>

А.Ф. Петров, науч. сотр., <https://orcid.org/0000-0001-7855-9267>

Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины (Днепр, Украина)

Методологические основы физико-химического моделирования и оптимизации процессов производства чугуна и стали

Посвящается памяти
Эдуарда Васильевича Приходько

В работе обобщен накопленный в Институте черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины (ИЧМ) опыт решения задач оптимизации металлургических технологий с использованием методологии физико-химического и математического моделирования, базовым ядром которого является разработанная Э.В. Приходько оригинальная методика моделирования шлаковых и металлических расплавов на основе концепции направленной химической связи. Рассмотрены особенности создания системы информационного обеспечения теоретической и прикладной металлургии на основе ретроспективного фонда экспериментальных фундаментальных физико-химических данных и фонда моделей металлургических систем и процессов их взаимодействия на макро- и микроуровнях. Описаны возможности разработанного в ИЧМ оригинального системного математического обеспечения создания документально-фактографических баз данных и прикладных программ оценки достоверности «зашумленных» многомерных массивов физико-химических и технологических данных на основе современных методов статистики и визуализации данных в различных сечениях путем целенаправленного проецирования.

Изложены принципы взаимодействия баз данных и базы моделей в режиме взаимной дополнительности. Обоснован выбор физико-химических критериев путем «свертки» информации о химическом составе многокомпонентных железорудных материалов, шлаковых и металлических расплавов и описаны подходы к прогнозированию их физико-химических свойств по схеме состав-структура-свойства. Рассмотрены вопросы учета влияния микронеоднородности строения металлических расплавов на формирование термодинамических и теплофизических свойств ферросплавов и специальных сплавов. Предложена методология создания систем управления качеством металлопродукции и методов многоцелевой оптимизации металлургических процессов, путем построения комплексных критериев показателей их эффективности. На примере задачи оптимизации доменной шихты предложен обобщенный критерий многоцелевой эффективности, обеспечивающий требуемое качество продуктов плавки и ее технико-экономические показатели.

Ключевые слова: базы данных, база моделей, металлургические расплавы, физико-химические свойства, критерии, многоцелевая многопараметрическая оптимизация.

Проблема повышения качества металла при низкой его себестоимости и требуемых экологических показателях является стратегической задачей металлургической промышленности. Фундаментальная наука в настоящее время накопила огромный арсенал знаний для глубокого понимания и объяснения механизма происходящих процессов при выплавке чугуна и стали, формирования физико-химических свойств готовой продукции. Определяющую роль в ликвидации разрыва между фундаментальными и прикладными исследованиями призваны сыграть современные информационные технологии.

Раскрывая понятие «структура вещества», материаловедение оперирует значительным числом факторов макро- и микромасштаба, взаимосвязанных

между собой столь сложным образом, что дифференциация влияния каждого из них на свойства практически на всех стадиях производства металлопродукции во многих случаях невозможна.

Поэтому многокомпонентные металлургические расплавы и получаемая из них металлопродукция на заключительных этапах на языке кибернетики можно охарактеризовать как плохо организованные, диффузные системы.

В этой связи особую актуальность приобретают вопросы познания физико-химической природы металлургических расплавов, что является основой для математического моделирования металлургических процессов на макро- и микроуровнях по схеме «состав-структура-свойства».

Изложение основных материалов исследования. Необходимость комплексного сочетания фундаментальных и прикладных разработок, систематизации фонда фундаментальных экспериментальных исследований и создания соответствующего математического обеспечения производства чугуна и стали неоднократно подчеркивалась в ряде работ специалистов подразделений физико-химического и математического моделирования Института. Теоретические основы физико-химического моделирования металлургических расплавов и создание системы анализа и выбора рациональных режимов работы металлургических агрегатов были изложены в сборниках тематических трудов Института, приуроченных к юбилейным датам Института [1–3].

Характерной особенностью этого периода явился вывод проблемы информационного обеспечения теоретической и прикладной металлургии на системный уровень. Институт занял лидирующее положение в выработке концептуальных основ информатизации отрасли и инициировал проведение трех Всесоюзных совещаний по тематике «Базы физико-химических и технологических данных для оптимизации металлургических технологий» – Днепропетровск, ИЧМ, 1988; Курган, КМИ, 1990; Новокузнецк, СМи, 1991.

На первый план выдвигался комплекс вопросов, связанных с созданием и актуализацией баз и банков экспериментальной информации. Уже к 1985 г. ИЧМ располагал мощным математическим обеспечением решения прикладных задач в части создания информационно-аналитических систем, включающих базы фундаментальных данных о свойствах металлургических расплавов, фонд математических и физико-химических моделей доменного, сталеплавильного производств и их фрагментов, современное системное обеспечение. Особую роль в обеспечении системы научных исследований ИЧМ играли оригинальные средства обработки «зашумленной» информации, реализующие средства многомерного сравнительного анализа – факторного анализа и таксономии, базирующихся на теории «размытых» множеств. Наличие этих разработок предопределило ведущую роль Института в решении отраслевой проблемы – создании системы информационного обеспечения теоретической и прикладной металлургии в рамках межотраслевого Банка данных «Металлургия» (БДМет).

На базе разработок Института 1988 г. было проведено Всесоюзное межотраслевое совещание «базы физико-химических и технологических данных для оптимизации металлургических технологий» с заказными докладами ведущих специалистов ИЧМ в области информационных технологий (Э.В. Приходько – принципы физико-химического моделирования металлургических расплавов, И.Г. Товаровский – особенности создания баз технологических данных, Д.Н. Тогобицкая – создание системного и прикладного обеспечения (БДМет)), которые курировали впоследствии эти направления в составе Совета БДМет при Госкомитете по науке и технике.

Институт черной металлургии (г. Днепр), как головной отраслевой институт, совместно с институтом

им. А.А. Байкова (г. Москва) занимал лидирующее положение в выработке концептуальных основ создания Банка данных «Металлургия», бифункционального по своему назначению и мультибазовой структуре. Информация о деятельности БДМет подробно освещалась на страницах академического журнала «Известия АН Металлургия. Металлы». Особенностью успешной плодотворной работы физхимиков и математиков явились разработки, направленные на создание авторизованного программного продукта, представленного информационно-аналитическими системами и комплексами, способными перерабатывать предметно-ориентированные данные в проблемно-ориентированном направлении. Каталог этих разработок опубликован в работе [4].

Следующее десятилетие отмечалось наложением на динамику научного поиска последствий развала Союза и перехода к рыночным условиям (1990–1999 гг.). В тоже время вывод проблемы информатизации теоретической и прикладной металлургии на отраслевой уровень требовал дальнейшей интеграции усилий специалистов этого направления. Было бы неоправданным расточительством остановить использование и развитие инновационных разработок в области теоретической и прикладной металлургии, сделанных за десятилетия высококвалифицированными творческими коллективами региональных научных центров.

Организационно этот вопрос решился в Институте путем слияния в марте 1992 года структурно самостоятельной лаборатории физико-химического моделирования металлургических процессов (зав. лаб. ЛФХМ д-р техн. наук Э.В. Приходько) и группы математического обеспечения НИР лаборатории электронного моделирования под руководством канд. техн. наук Д.Н. Тогобицкой. Движущим мотивом этого слияния была общность идейных позиций руководителей двух коллективов (фото) при решении вопросов, связанных с поисками эффективных путей работы с экспериментальной информацией и ее теоретическим осмысливанием.

Первое направление разработок было связано с созданием и актуализацией баз и банков экспериментальной информации. На протяжении всей деятельности отдела физико-химических проблем базы фундаментальных данных постоянно актуализировались как в части собственно информационного



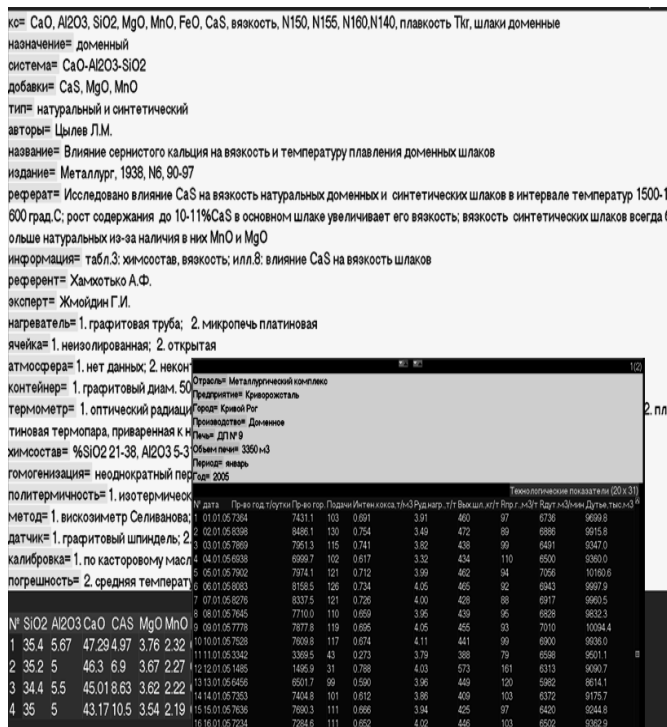


Рис. 1. Машинные паспорта базы «Шлак» и технологической информации

фонда, так и математического обеспечения гибкой работы с информацией – разработка программ оперативного поиска (оригинальная информационно-поисковая система (ИПС) ведения документально-фактографических баз разработана Ю.М. Лихачевым) в соответствии со строгими правилами паспортизации [5], так и методов обработки данных – соответствующего прикладного математического обеспечения, многопланового проецирования данных, выделения трендовой составляющей, локализации отдельных областей и сечений, матричных методов многомерного сравнительного анализа (факторный анализ, таксономия, операции с размытыми множествами), оригинальных алгоритмов оптимизации.

В последнее время авторами [6] создана новая база данных «Ферросплавы», содержащая информацию о теплофизических свойствах отечественных и зарубежных марок ферросплавов.

На рис. 1–3 представлены отдельные фрагменты информационного обеспечения Банка данных «Металлургия». На рис. 4 – фрагменты прикладного обеспечения.

К настоящему времени база данных «Шлак» пополнена новой информацией о фазовом составе систем: $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$, $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$, $\text{SiO}_2\text{-MgO-Al}_2\text{O}_3$, $\text{MgO-CaO-Al}_2\text{O}_3$, $\text{SiO}_2\text{-CaO-MgO}$, – в процессе их кристаллизации и о свойствах образующихся при этом минералов, по данным авторов В.Г. Воскобойникова, В.Е. Васильева, А.Г. Русаковой (рис. 5). Также были введены в базу данные о вискозиметрических свойствах шлаковых расплавов, содержащих различные углеродистые добавки, в частности по данным, что особенно важно в связи с сокращением природного газа и его замены углеродсодержащими добавками, в частности пылеугольным



Рис. 2. Видеокадр базы «Шлак» по запросу «авторы» – «система»



Рис. 3. Структура информационного ресурса о свойствах железорудных материалов, шлаковых и металлических расплавов «Расплав»

ТОПЛИВОМ (ПУТ).

Данные о фазовом составе оксидных систем и физико-химических свойствах отдельных фаз представляют особый интерес при изучении минералогического состава конечных доменных шлаков, что дает определенные представления о природе шлаковых расплавов. Знание минералогического состава необходимо также и для дальнейшего использования шлаков в качестве строительного сырья.

Второе направление разработок по созданию основ оптимизации металлургических процессов связано с созданием интеллектуального ресурса – базы моделей структуры свойств железорудных материалов, получаемых расплавов на различных стадиях получения полупродукта и готовой металлопродукции (рис. 3).

Успешное решение этих задач, на наш взгляд, связано с прогнозированием физико-химических, механических, эксплуатационных свойств металла путем математического моделирования неразрывной

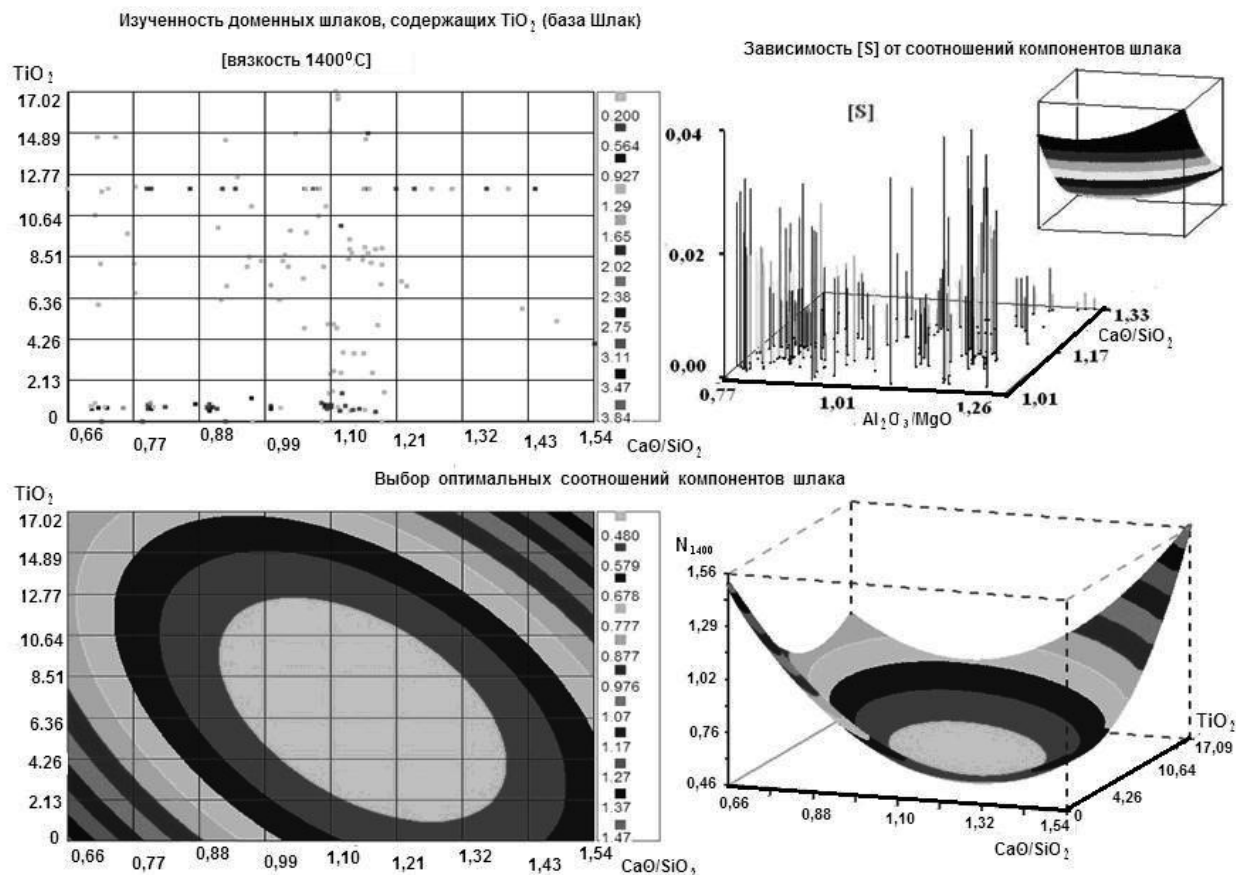


Рис. 4. Фрагменты подсистемы обработки данных

цепи «состав–структура–свойства» [7]. Наиболее активно в настоящее время развиваются и используются для объяснения физико-химических и структурных особенностей жидких металлических систем представления об их микрогетерогенном строении (кластерном), которые частично отображены в работах [8, 9]. По мнению авторов Wilson J.R., Hansen J.P., дальнейшие перспективы использования кластерной модели строения металлических расплавов заключаются в возможности описания процессов образования неметаллических включений, наследственности шихты, установления взаимосвязи между структурой и свойствами расплавов.

Для решения задач моделирования закономерностей, связывающих состав, структуру и свойства расплавов, используется оригинальная концепция физико-химического моделирования процессов межатоминого взаимодействия в расплавах и растворах, разработанная Э.В. Приходько [1, 7]. В соответствии с ней, металлические расплавы рассматриваются как химически единые системы, изменение состава которых сказывается на комплексе физико-химических свойств через изменение параметров их электронной структуры.

Методика их определения базируется на следующих допущениях:

1. Электронное облако взаимодействующих атомов не сферическое, а деформированное. Свойство деформации – анизотропия, способность вытягиваться одних и сокращаться в других направлениях взаимодействия.

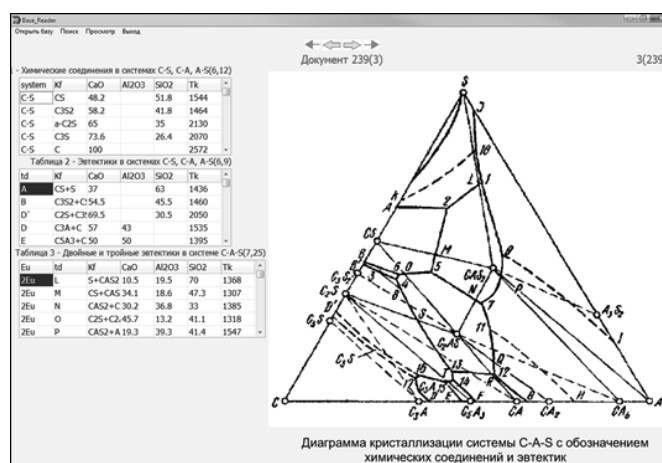


Рис. 5. Фрагмент документа базы данных «Шлак» в ИПС, содержащий информацию о фазовом составе системы $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$

2. Заряды катионов и анионов не целочисленные, могут иметь широкий спектр дробных значений. Эти значения должны не постулироваться, а вычисляться с учетом конкретного кристаллографического окружения, в первую очередь в зависимости от межъядерного расстояния (d).

3. Ионное условие электронейтральности в виде равенства суммы зарядов нулю должно быть переформулировано с учетом условия 5.

4. Размеры ионов, подобно всем свойствам атомов в соединениях – переменная величина. Нет размеров ионов вообще, есть их размеры относительно того или иного иона. Это понятие, как и многие другие (кислотность, основность, химический потенциал

и т. п.) определяется всегда для пары атомов, то есть являются относительными. Существующие кристалло-химические системы ионных радиусов позволяют, как показано во многих литературных источниках, оценивать межатомные расстояния, но не дают действительных размеров ионов.

5. Выравнивание «сшивание» электронной плотности в зоне сочленения ионных остовов взаимодействующих атомов в зависимости от d между ними для каждого конкретного направления взаимодействия связано с перераспределением электронов между направлениями взаимодействия. Для численной характеристики этих процессов по кратчайшим направлениям взаимодействия рассчитывается параметр Δe , численно равен сумме Z партнеров A и B конкретной связи. При этом обеспечивается выполнения условия выравнивания зарядов плотности ($\rho_A = \rho_B$), являющегося прообразом условия выравнивания химических потенциалов реагентов.

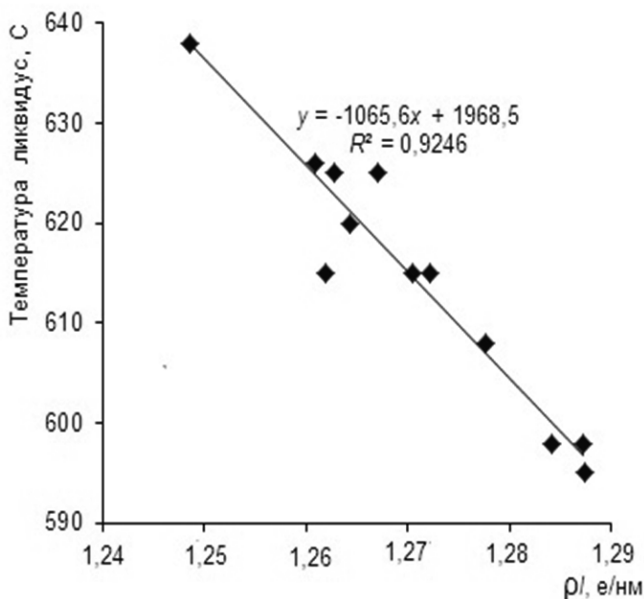
При исследовании взаимосвязи между составом, строением и свойствами металлических расплавов, включая многокомпонентные, Э.В. Приходько обоснована целесообразность использования модели ОЦК – подобной упаковки атомов. В этом случае соотношение между эффективными зарядами (Z) для первой (Z_1^x) и второй (Z_2^y) координационных сфер подавляющего большинства металлических расплавов описывается уравнением $4Z_1^x = -Z_2^y$.

Как отмечает автор, по физическому смыслу оно выражает в терминах зарядов интегральное условие равновесия сил притяжения и отталкивания, действующих на любой атом в многокомпонентной системе со стороны партнеров его связей с соседями в первых двух координационных сферах. В настоящее время ведутся работы по развитию модели в части

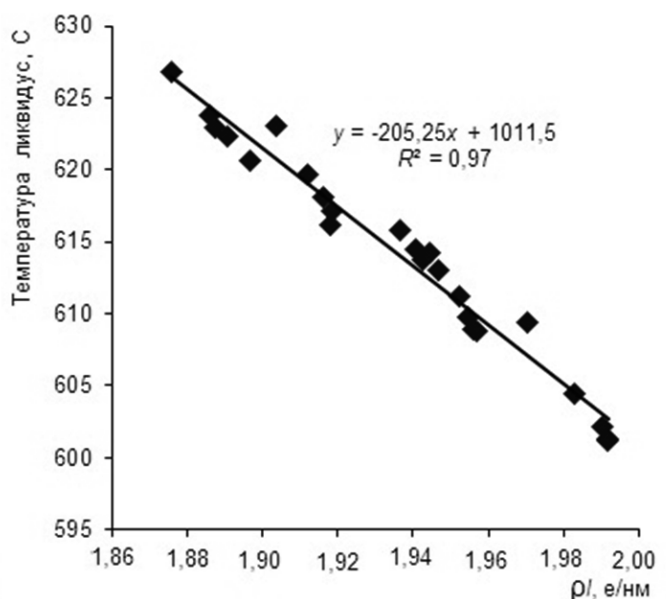
учета межатомных взаимодействий расплавов группы железа с атомами (C, B, H, O, N).

Использование этой модели открыло новые возможности для полуэмпирического обобщения опытных данных о свойствах расплавов и продуктов их кристаллизации. Эти возможности связаны с разработкой единой формы кодировки информации о составе расплавов, соединений и растворов в виде сочетания интегральных и парциальных модельных параметров межатомного взаимодействия. Основные принципы и методика оценки влияния межатомного взаимодействия в процессах легирования и микролегирования предложены авторами в работе [10, 11]. Основными из них являются химический эквивалент состава (Z^y), суммирующий информацию о зарядах компонентов с учетом вероятности образования связей разного типа, и структурный параметр (d), характеризующий среднестатистическое расстояние между атомами в расплаве. Дополнительно к химическому эквиваленту и структурному параметру в ряде случаев используется электрохимический – $\text{tg}\alpha$, характеризующий изменение радиусов ионов при изменении их зарядов. По физическому смыслу каждый из этих параметров является аналогом электронного (Z^y), размерного (d) и электрохимического ($\text{tg}\alpha$) факторов.

Следует заметить, что используемые критерии Z^y и d характеризуют расплавы как однородные системы. Это допущение в известной мере идеализирует состояние их структуры. Для системного учета влияния микронеоднородности расплавов на их свойства предложено рассчитывать избыточные значения Z^y и d [12]. Соответствующие значения (ΔZ^y) и (Δd) определяются как разница между Z^y и d для разупорядоченных систем и механической смеси из исход-



а



б

Рис. 6.

Зависимость температуры ликвидус магниевых (а) и алюминиевых (б) сплавов от параметра направленной зарядовой плотности

ных компонентов этой системы, то есть где n_i – атомная доля компонента расплава.

Особенно эффективной проявилась информационная мощность параметра ρ для прогнозирования температур плавления и кристаллизации стали и сплавов специального назначения [13], например алюминиевых, магниевых, жаропрочных, никелевых и др. (рис. 6).

В отдельных случаях, например, жаропрочных, никелевых сплавов, по данным работы [13], прогнозные модели на основе указанных параметров межатомного взаимодействия обеспечили более точную оценку по сравнению с расчетами программного комплекса *jMatPro*.

В последнее время особенно активно ведутся работы по наполнению базы «Ферросплавы», содержащие экспериментальную информацию о 260 составах отечественных и зарубежных ферросплавов (феррохрома, ферросилиция, ферромарганца, феррованадия, ферротитана, феррониобия, ферроникеля, ферроциркония, ферромolibдена, силикокальция, силикомарганца, ферросилиция и др.). С использованием параметров межатомного взаимодействия получены модели для прогнозирования вышеуказанных свойств, которые используются нами при оптимизации процессов доводки стали [10, 14].

Третье направление связано с разработкой оригинальных методов многокритериальной оптимизации процессов выплавки чугуна и стали.

С использованием параметров межатомного взаимодействия, как метода «свертки» многокомпонентных составов, значительно упрощаются задачи оптимизации свойств металлопродукции по схеме состав – структура – технология обработки – свойства. Снижается параметричность моделей, что особенно упрощает реализацию процедур многокритериальной оптимизации. Так, для условий ПАО «Днепро-спецсталь», совместно с инженерно-техническими службами предприятия, на основе вышеописанной методики моделирования разработаны инструментальные средства сквозного анализа металлопродукции из легированной и высоколегированной электро-стали текущего и перспективного марочного сортамента [10, 11].

Выявлены нелинейные зависимости, оригинальные способы построения комплексных критериев качества и стоимости в виде $F^* = f(F_i)$, где F_i – частные критерии вида:

$$F^* = \prod_{i=1}^m \frac{y_i}{y_{in}},$$

где y_i – прочностные и эксплуатационные свойства металлопродукции, y_{in} – заданные низшие границы стандартов или технических условий (ТУ), которые необходимо оптимизировать, позволили выйти на эффективные микролегирующие элементы – В, V и др.

Наличие прогнозных моделей для технологических свойств ферросплавов и специальных сплавов

позволяют выбрать соответственно оптимальную добавку при доводке стали.

Методика моделирования оксидных (солевых) систем базируется на предложенной Э.В. Приходько концепции направленной химической связи и подробно описана нами в монографии [1].

В монографии изложен опыт работы по созданию интегрированной базы знаний о свойствах оксидных систем, включающей базы фундаментальных и экспериментальных физико-химических данных.

Описана методика «свертки» химического состава многокомпонентных железорудных материалов, шлаковых расплавов и оксидных систем различного технологического назначения (железные руды, агломерат, окатыши, доменные и сталеплавильные шлаки, шлакообразующие смеси, горные породы, стекла, цементы) и представлены модели для прогнозирования их физико-химических свойств на основе параметров межатомного взаимодействия.

Изложен опыт внедрения разработанных алгоритмических и программных средств в автоматизированной системе научных исследований (АСНИ) и автоматизированной системе управления технологическими процессами (АСУ ТП) ряда металлургических предприятий отрасли [15].

В последнее время нами разработана концепция моделирования процессов направленного формирования расплавов в доменной печи, которая базируется на описании процессов агрегатных и фазовых превращений материалов в доменной печи, взаимодействий в системе «металл-шлак» и формировании продуктов плавки [16, 17].

Разработанные интегральные критерии качества доменной шихты и температурно-дутьевого режима ($K_{ш}$ и K_T) позволили выйти на решение задач прогнозирования коэффициентов распределения элементов шихты между чугуном и шлаком и разработки на этой основе алгоритмических средств направленного формирования состава продуктов доменной плавки:

$$K_{ш} = \left(\frac{Fe_{об}}{SiO_2}\right)^{\alpha_1} \cdot \left(\frac{CaO}{SiO_2}\right)^{\alpha_2} \cdot \left(\frac{Al_2O_3}{SiO_2}\right)^{\alpha_3} \cdot \left(\frac{MgO}{SiO_2}\right)^{\alpha_4} \cdot \left(\frac{R_2O}{CaO}\right)^{\alpha_5} \cdot \left(\frac{T_{кт}}{T_{нф}}\right)^{\alpha_6} \cdot \left(\frac{FeO_{пш}}{-\Delta e/p}\right)^{\alpha_7},$$

где $Fe_{об}/SiO_2$ – показатель богатства шихты; CaO/SiO_2 – основность шихты; MgO/SiO_2 , Al_2O_3/SiO_2 , R_2O/SiO_2 – магнезиальный, глиноземный и щелочной модули шихты; $FeO_{пш}$ – содержание FeO в первичном шлаке; $T_{нф}$, $T_{кт}$ – температура начала фильтрации и температура капельного течения; Δe и p – химический эквивалент состава и показатель стехиометрии шихты.

$$K_T = TИП^{0,4} \cdot \eta_{CO}^{0,3} \cdot L_{фз}^{0,3},$$

где: ТИП – температурный индекс печи; $\eta_{CO}^{0,3}$ – степень использования газа; $L_{фз}^{0,3}$ – глубина фурменной зоны.

С позиции межатомного взаимодействия в расплаве объяснен механизм влияния оксидов калия и натрия на структуру доменных шлаков.

Получена модель щелочной емкости доменного шлака, который позволяет выполнить оперативную прогнозную оценку содержащихся щелочей в шлаке и своевременно осуществить корректировку доменной шихты, обеспечивающей максимальный вывод щелочей из доменной печи [18, 19].

Эти разработки обеспечили предпосылки для решения обратной задачи – выбора рационального состава доменной шихты, что особенно важно с ухудшением сырьевых и энергетических ресурсов работы доменных печей Украины. На основе современных приемов генерации комплексных критериев оптимизации многопараметрических процессов (логин-преобразование, вероятностная функция Харингтона и др.) разработана компьютерная система оптимизации состава шихты, обеспечивающие требуемое качество продуктов плавки, которая прошла промышленное опробование на ряде печей комбинатов «АрселорМиттал Кривой Рог», «Запорожсталь». На рис. 7 представлен видеокادر системы, которая базируется на 5-ти разработанных нами патентах.

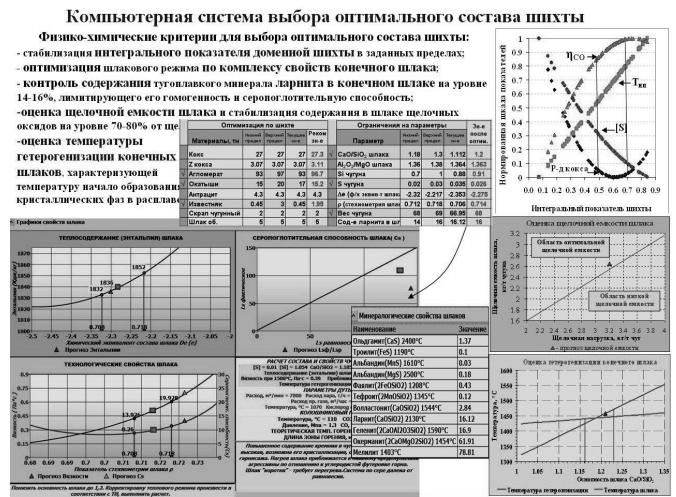
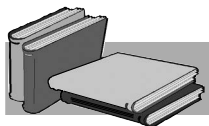


Рис. 7. Видеокادر системы выбора оптимального состава шихты

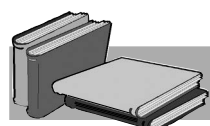


ЛИТЕРАТУРА

1. Приходько Э.В., Тогобицкая Д.Н., Хамхотько А.Ф., Степаненко Д.А. Прогнозирование физико-химических свойств оксидных систем. Монография. Днепропетровск: Пороги, 2013. 344 с.
2. Тогобицкая Д.Н., Жмойдин Г.И. Проблема информационного обеспечения теоретической и прикладной металлургии. Известия АН СССР. Металлургия. Металлы. 1991. № 4. С. 217–220.
3. 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.
4. Тогобицкая Д.Н., Жмойдин Г.И. Авторизированный компьютерный продукт в отечественной металлургии. Известия АН России. Металлургия. Металлы. 1996. № 1. С. 29–45.
5. Тогобицкая Д.Н., Жмойдин Г.И., Приходько Э.В. О паспортизации экспериментальных материалов для банка данных «Металлургия». Известия вузов. Черная металлургия. 1988. № 8. С. 136–139.
6. Тогобицкая Д.Н., Пиптюк В.П., Петров А.Ф., Греков С.В., Снигура И.Р., Лихачев Ю.М., Головкин Л.А. Базы данных и модели для экспертной оценки эффективности использования ферросплавов при производстве стали. Сб. науч. тр. ИЧМ «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии». 2017. Вып. 31. С. 150–165.
7. Приходько Э.В., Тогобицкая Д.Н. Свойства металлургических расплавов – следствие их состава и структуры. Труды Института проблем материаловедения им. И.Н. Францевича НАН Украины «Современные проблемы физического материаловедения». 2017. Вып. 26. С. 124–138.
8. Труды XIII Российской конференции «Строение и свойства металлических и шлаковых расплавов». Т. 1. Екатеринбург: УрО РАН, 2011. 218 с.
9. Найдек В.Л., Мельник С.Г., Верховлюк А.М. Кластеры – структурные составляющие металлических расплавов. Металл и литье Украины. 2015. № 7. С. 21–24.
10. Тогобицкая Д.Н., Пиптюк В.П., Логозинский И.Н., Левин Б.А., Козачек А.С., Кукса О.В., Лихачев Ю.М. Системный подход к выбору оптимального элементного состава стали, обеспечивающего требуемый уровень механических свойств. Системные технологии. Региональный сборник научных трудов. Днепропетровск. 2015. Вып. 2(97). С. 91–97.
11. Тогобицкая Д.Н., Пиптюк В.П., Логозинский И.Н., Левин Б.А., Козачек А.С., Кукса О.В., Лихачев Ю.М. Оптимизация химического состава стали 14X17H2 на основе концепции направленной химической связи. Сб. науч. тр. ИЧМ «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии». Днепропетровск. 2015. Вып. 30. С. 312–323.
12. Togobitskaya D.N., Piptyuk V.P., Petrov A.F., Grekov E.V., Mirgorodskaya A.S. Prediction of Ferroalloy Properties for Expert Evaluation of the Efficiency of their Use During Addition to Steel in a Ladle Furnace Unit. Metallurgist. 2019. Vol. 62. Iss. 11–12. P. 1115–1122. doi: <https://doi.org/10.1007/s11015-019-00763-5>.

13. Тогобицкая Д.Н., Шапер М., Гридин О., Левин Б.А., Снигура И.Р. Компьютерное моделирование температур плавления и кристаллизации сплавов специального назначения. *Сталь*. 2018. № 6. С. 11–15.
14. Бабаченко А.И., Тогобицкая Д.Н., Козачек А.С., Кононенко А.А., Кныш А.В., Снигура И.Р. Оптимизация химического состава стали для железнодорожных колес, обеспечивающего стабилизацию механических и повышение эксплуатационных свойств. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2016. № 2. С. 67–73.
15. Тогобицкая Д.Н., Белькова А.И., Хамхотко А.Ф., Степаненко Д.А., Оторвин П.И., Нынь С.В. Опыт создания и внедрения системы контроля и управления шлаковым режимом доменной плавки в шихтовых и технологических условиях заводов Украины. *Сб. науч. тр. ИЧМ «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии»*. Днепропетровск. 2009. Вып. 19. С. 100–112.
16. Тогобицкая Д.Н., Белькова А.И., Степаненко Д.А. и др. Выбор состава доменной шихты, обеспечивающего направленное формирование жидких продуктов доменной плавки. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2016. № 3. С. 11–18.
17. Тогобицкая Д.Н., Белькова А.И., Степаненко Д.А., Скачко А.С. Комплексный подход к выбору оптимального состава доменной шихты. *Спеціальна металургія: вчора, сьогодні, завтра. КПІ ім. Ігоря Сікорського*. Київ, 2018. С. 321–335.
18. Togobitskaya D.N., Tsyupa N.A., Otorvin P.I., Skachko A.S. Removal of Alkaline Compounds from Blast Furnaces by Means of Slag. *Steel in Translation*. 2018. Vol. 48. No. 5. P. 301–306.
19. Тогобицкая Д.Н., Белькова А.И., Степаненко Д.А. Физико-химические основы выбора состава доменной шихты с целью направленного формирования продуктов плавки. Коллективный труд «Познание процессов доменной плавки». Днепр: Пороги, 2016. С. 286–321.

Поступила 17.09.2019



REFERENCES

1. Prihod'ko, E.V., Togobitskaya, D.N., Hamhot'ko, A.F., Stepanenko, D.A. (2013). Prediction of the physicochemical properties of oxide systems. Dnepropetrovsk: Porogi, 344 p. [in Russian].
2. Togobitskaya, D.N., Zhmoidin, G.I. (1991). The problem of information support of theoretical and applied metallurgy. *Izvestiya AN USSR. Metallurgiya. Metall. Proceedings of the USSR Academy of Sciences. Metallurgy. Metals*, no. 4, pp. 217–220 [in Russian].
3. Prihod'ko, E.V., Togobitskaya, D.N. (2001). The role of information technology in improving the quality of metal product. *Naukovi pratsi "Suchasni problemy metalurgii". Materialy NPK "Problemy i perspektyvy oderzhannya konkurentnozdatoї produktsii v gornicho-metalurgiinomu kompleksі Ukraїni". Science and Technology "The Problems of Metallurgy". Materials NPK "Problems and prospects of gaining competitive products in the iron and steel complex of Ukraine"*. Dnipropetrov'k, vol. 3, pp. 450–462 [in Russian].
4. Togobitskaya, D.N., Zhmoidin, G.I. (1996). Authorized computer product in domestic metallurgy. *Izvestiya AN Rossii. Metallurgiya. Metall. Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Metallurgy. Metals*, no. 1, pp. 29–45 [in Russian].
5. Togobitskaya, D.N., Zhmoidin, G.I., Prihod'ko, E.V. (1988). About certification of experimental materials for the Metallurgy database. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya. Proceedings of universities. Ferrous metallurgy*, no. 8, pp. 136–139 [in Russian].
6. Togobitskaya, D.N., Piptiuk, V.P., Petrov, A.F., Grekov, S.V., Snigura, I.R., Lihachev, Yu.M., Golovko, L.A. (2017). Databases and models for expert assessment of the efficiency of using ferroalloys in steel production. *Sb. nach. tr. IChM "Fundamental'nye i prikladnye problemy chernoj metallurgii". Sb. nauch. tr. ISI "Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy"*, iss. 31, pp. 150–165 [in Russian].
7. Prihod'ko, E.V., Togobitskaya, D.N. (2017). Properties of metallurgical melts – a consequence of their composition and structure. *Trudy Instituta problem materialovedeniya im. I.N. Frantsevicha NAN Ukrainy "Sovremennye problemy fizicheskogo materialovedeniya". Transactions of the Institute of Problems of Materials Science named after I.N. Frantsevich NAS of Ukraine "Modern problems of physical materials science"*, iss. 26, pp. 124–138 [in Russian].
8. Proceedings of the XIII Russian Conference "The structure and properties of metal and slag melts". Ekaterinburg: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Ekaterinburg: UrO RAN, 2011, vol. 1, 218 p. [in Russian].
9. Naidek, V.L., Mel'nik, S.G., Verkhovliuk, A.M. (2015). Clusters – structural components of metal melts. *Metal and Casting of Ukraine*, no. 7, pp. 21–24 [in Russian].
10. Togobitskaya, D.N., Piptiuk, V.P., Logozinskij, I.N., Levin, B.A., Kozachek, A.S., Kuksa, O.V., Lihachev, Yu.M. (2015). A systematic approach to choosing the optimal elemental composition of steel providing the required level of mechanical properties. *Sistemnye tekhnologii. Regional'nyi sbornik nauchnykh trudov. System Technologies. Regional collection of scientific papers*, Dnepropetrovsk, iss. 2(97), pp. 91–97 [in Russian].

11. *Togobitskaya, D.N., Piptiuk, V.P., Logozinskij, I.N., Levin, B.A., Kozachek, A.S., Kuksa, O.V., Lihachev, Yu.M.* (2015). Optimization of the chemical composition of steel 14Kh17N2 based on the concept of directional chemical bonding. *Sb. nauch. tr. IChM "Fundamental'nye i prikladnye problemy chernoj metallurgii". Sb. nauch. tr. ISI "Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy"*. Dnepropetrovsk, iss. 30, pp. 312–323 [in Russian].
12. *Togobitskaja, D.N., Piptyuk, V.P., Petrov, A.F., Grekov, E.V., Mirgorodskaya, A.S.* (2019). Prediction of Ferroalloy Properties for Expert Evaluation of the Efficiency of their Use During Addition to Steel in a Ladle Furnace Unit. *Metallurgist*, vol. 62, iss. 11–12, pp. 1115–1122. doi: <https://doi.org/10.1007/s11015-019-00763-5> [in English].
13. *Togobitskaya, D.N., Shaper, M., Gridin, O., Levin, B.A., Snigura, I.R.* (2018). Computer simulation of the melting and crystallization temperatures of special alloys. *Stal'. Steel*, no. 6, pp. 11–15 [in Russian].
14. *Babachenko, A.I., Togobitskaya, D.N., Kozachek, A.S., Kononenko, A.A., Knysh, A.V., Snigura, I.R.* (2016). Optimization of the chemical composition of steel for railway wheels, providing stabilization of mechanical and improving operational properties. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'. Metallurgical and mining industry*, no. 2, pp. 67–73 [in Russian].
15. *Togobitskaya, D.N., Bel'kova, A.I., Hamhot'ko, A.F., Stepanenko, D.A., Otorvin, P.I., Nyn', S.V.* (2009). The experience of creating and implementing a system for monitoring and controlling the slag regime of blast furnace smelting in charge and technological conditions of Ukrainian plants. *Sb. nach. tr. IChM "Fundamental'nye i prikladnye problemy chernoj metallurgii". Sb. nauch. tr. ISI "Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy"*. Dnepropetrovsk, iss. 19, pp. 100–112 [in Russian].
16. *Togobitskaya, D.N., Bel'kova, A.I., Stepanenko, D.A.* (2016). The choice of the composition of the blast furnace charge, which provides the directed formation of liquid products of blast furnace smelting. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'. Metallurgical and mining industry*, no. 3, pp. 11–18 [in Russian].
17. *Togobitskaya, D.N., Bel'kova, A.I., Stepanenko, D.A., Skachko, A.S.* (2018). An integrated approach to the selection of the optimal composition of a blast furnace. *Spetsial'na metalurgiya: vchera, s'ogodni, zavtra. KPI im. Igora Sikors'kogo. Special metallurgy: yesterday, today, tomorrow. KPI im. Igor Sikorsky*, Kyiv, pp. 321–335 [in Russian].
18. *Togobitskaya, D.N., Tsyupa, N.A., Otorvin, P.I., Skachko, A.S.* (2018). Removal of Alkaline Compounds from Blast Furnaces by Means of Slag. *Steel in Translation*, vol. 48, no. 5, pp. 301–306 [in Russian].
19. *Togobitskaya, D.N., Bel'kova, A.I., Stepanenko, D.A.* (2016). Physico-chemical basis for the selection of the composition of the blast furnace with the aim of the directed formation of smelting products. *Kollektivnyj trud "Poznanie protsessov domennoj plavki"*. Collective work "Cognition of the processes of blast furnace smelting", Dnepr: Porogi, pp. 286–321 [in Russian].

Received 17.09.2019

Анотація

Д.М. Тогобицька, д-р техн. наук, проф., зав. відділу, e-mail: dntog@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-6413-4823>; **А.І. Белькова**, канд. техн. наук, ст. наук. співр., e-mail: alla2904b8@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8519-9351>; **Д.О. Степаненко**, канд. техн. наук, ст. наук. співр., e-mail: d.gorodenskiy@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0184-8295>; **О.П. Петров**, наук. співр., <https://orcid.org/0000-0001-7855-9267>

Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України (Дніпро, Україна)

Методологічні основи фізико-хімічного моделювання і оптимізації процесів виробництва чавуну і сталі

*Присвячується пам'яті
Едуарда Васильовича Приходька*

В роботі узагальнено накопичений в Інституті чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України (ІЧМ) досвід вирішення завдань оптимізації металургійних технологій з використанням методології фізико-хімічного та математичного моделювання, базовим ядром якого є розроблена Е.В. Приходьком оригінальна методика моделювання шлакових і металевих розплавів на основі концепції спрямованого хімічного зв'язку. Розглянуто особливості створення системи інформаційного забезпечення теоретичної та прикладної металургії на основі ретроспективного фонду експериментальних фундаментальних фізико-хімічних даних та фонду моделей металургійних систем і процесів їх взаємодії на макро- і мікрорівнях. Описано можливості розробленого в ІЧМ оригінального системного математичного забезпечення створення документально-фактографічних баз даних і прикладних програм оцінки достовірності «зашумлених» багатовимірних масивів фізико-хімічних і технологічних даних на основі сучасних методів статистики і

візуалізації даних в різних перетинах шляхом цілеспрямованого проектування.

Викладено принципи взаємодії баз даних і бази моделей в режимі взаємної додатковості. Обґрунтовано вибір фізико-хімічних критеріїв шляхом «згортки» інформації про хімічний склад багатокомпонентних залізородних матеріалів, шлакових і металевих розплавів і описано підходи до прогнозування їх фізико-хімічних властивостей за схемою склад-структура-властивості. Розглянуто питання врахування впливу мікронеоднорідності будови металевих розплавів на формування термодинамічних і теплофізичних властивостей феросплавів і спеціальних сплавів. Запропоновано методологію створення систем управління якістю металопродукції і методів багатоцільової оптимізації металургійних процесів, шляхом побудови комплексних критеріїв показників їх ефективності. На прикладі задачі оптимізації доменної шихти запропоновано узагальнений критерій багатоцільової ефективності, що забезпечує необхідну якість продуктів плавки і її техніко-економічні показники.

Ключові слова

Бази даних, база моделей, металургійні розплави, фізико-хімічні властивості, критерії, багатоцільова багатопараметрична оптимізація.

Summary

D.N. Togobitskaya, Dr. Sci. (Engin.), Professor, Head of the Department, e-mail: dntog@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-6413-4823>; **A.I. Bel'kova**, PhD (Engin.), Senior Researcher, e-mail: alla2904b8@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8519-9351>; **D.A. Stepanenko**, PhD (Engin.), Senior Researcher, e-mail: d.gorodenskiy@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0184-8295>; **A.F. Petrov**, Researcher, <https://orcid.org/0000-0001-7855-9267>

Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov of the NAS of Ukraine (Dnipro, Ukraine)

Methodological bases of physical and chemical modeling and optimization of processes of production of iron and steel

*Dedicated to memory of
Eduard Vasil'evich Pryhodko*

The experience of solving problems of optimization of metallurgical technologies using the methodology of physicochemical and mathematical modeling, the basic of which is developed by E.V. Pryhodko, is an original method of modeling of slag and metal melts based on the concept of directed chemical bond. The features of creation of information support system of theoretical and applied metallurgy on the basis of retrospective fund of experimental fundamental physicochemical data and fund of models of metallurgical systems and processes of their interaction at macro and micro levels are considered. Possibilities of original systematic mathematical support for creation of document-factual databases and applications of reliability estimation of "noisy" multidimensional arrays of physico-chemical and technological data based on modern methods of statistics and data visualization at different cross sections by purposeful design are described.

The principles of interaction between databases and model databases in the mode of mutual additionality are outlined. The choice of physicochemical criteria by "convolution" of information on the chemical composition of multicomponent iron ore materials, slag and metal melts is substantiated, and approaches to the prediction of their physicochemical properties according to the structure-structure-properties scheme are described. The problems of taking into account the influence of microinhomogeneity of the structure of metal melts on the formation of thermodynamic and thermophysical properties of ferroalloys and special alloys are considered. The methodology of creation of quality management systems of metal products and methods of multi-purpose optimization of metallurgical processes is proposed by constructing complex criteria of their efficiency indicators. An example of a blast furnace charge optimization problem is a generalized multi-purpose efficiency criterion that provides the required quality of melting products and its technical and economic indicators.

Keywords

Databases, model base, metallurgical melts, physical and chemical properties, the criteria, multipurpose multi-parameter optimization.

УДК 669.162

А.Ф. Шевченко, д-р техн. наук, проф., вед. науч. сотр., e-mail: ovoch-isi@outlook.com, <https://orcid.org/0000-0003-0867-6825>;**И.А. Маначин**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., e-mail: ovoch-isi@outlook.com, <https://orcid.org/0000-0001-9795-6751>**Б.В. Двоскин**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., e-mail: ovoch-isi@outlook.com, <https://orcid.org/0000-0003-2891-7833>**В.Г. Кисляков**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., зав. отделом, e-mail: ovoch-isi@outlook.com, <https://orcid.org/0000-0002-1775-5050>**С.А. Шевченко**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., e-mail: ovoch-isi@outlook.com, <https://orcid.org/0000-0002-9289-9177>**В.И. Елисеев**, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр., ст. науч. сотр., e-mail: ovoch-isi@outlook.com**А.С. Вергун**, д-р техн. наук, ст. науч. сотр., ст. науч. сотр., e-mail: ovoch-isi@outlook.com, <https://orcid.org/0000-0001-5493-9214>**А.В. Остапенко**, науч. сотр., e-mail: ovoch-isi@outlook.com

Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины (Днепр, Украина)

Теоретические и технологические основы обменных процессов при инъекционной десульфурации чугуна различными реагентами

Представлены результаты расчетно-аналитических разработок для реализации наиболее рационального механизма различных технологий на основе вдувания извести и магния. Показано, что пути реализации рациональных решений и механизма этих процессов различны. При вдувании оксида кальция необходимо организовать химическое взаимодействие с участием вносимого извне Al, а также разрушение и диспергирование зоны истечения потока из фурмы в чугун при помощи газообразующих в чугуне добавок. Сопоставление расчетных удельных расходов различных восстановителей свидетельствует, что применение магния и марганца чугуна представляется наименее рациональным, так как сопровождается наибольшими удельными расходами. Для всех типоразмеров частиц скорость движения меньше 30 м/с является нерациональной, так как сопровождается резким уменьшением глубины внедрения частиц в расплав чугуна. Показано, что при вдувании порошкообразных молотых реагентов с диаметром частиц < 0,8 мм, частицы практически не внедряются в расплав чугуна. Такое явление является нежелательным, так как сопровождается резким уменьшением активной поверхности вводимого реагента. При моноинъекции магния необходимо обеспечить зернистый состав реагента и высокую (более 80 м/с) скорость истечения потока в расплав чугуна. При вдувании зернистых реагентов с диаметром частиц более 0,4 мм параметр скорости является определяющим, так как обеспечивает возможность внедрения частиц реагента в расплав чугуна на глубину вплоть до 20–25 мм. При соблюдении рекомендованных параметров вдувания зернистого магния в большинстве обработок чугуна содержание магния в чугуне после рафинирования превышает равновесные значения системы равновесия [Mg] – [S]. Последнее обеспечивает устойчивость и надежность процесса десульфурации чугуна моноинъекцией зернистого магния. Обеспечивается степень десульфурации до 95–99 %. Теоретические положения подтверждены экспериментально.

Ключевые слова: магний, известь, инъекция, десульфурация, эффективность десульфурации, скорость частиц.

Внепечная десульфурация чугуна и очищение чугуна от шлака заняли важное место в технологической цепи современного металлургического производства [1–5] получения жидкого чугуна и выплавки стали [1, 3, 4, 5]. Особенно это стало закономерным в связи с необходимостью выплавки низкосернистых и особочистых по сере сталей [2, 3, 5, 6], а также повышением экономичности процессов выплавки чугуна и стали.

В этой связи в последнее время существенно расширены и ужесточены требования к процессам подготовки жидкого чугуна к сталеплавному переделу.

Перечень этих требований в основе включает следующее:

1. Процесс десульфурации чугуна должен устойчиво и надежно снижать содержание серы в чугуне с 0,015–0,120 до 0,05–0,015 %, а в части чугуна до < 0,001–0,002 %.
2. Степень гарантии комплекса показателей ≥ 95 %.
3. Продолжительность цикла всех операций внепечной обработки чугуна (постановка ковша, замер температуры чугуна, отбор проб, десульфурация и удаление шлака) должна составлять ≤ 20 –25 мин.
4. Обеспечение внепечной обработки чугуна в

широких пределах исходной температуры расплава в ковше – 1220–1450 °С (в основе).

5. Наименьшие потери температуры чугуна – < 6–10 °С (в основе).

6. Наименьшие потери чугуна < 0,2 % (от массы чугуна в ковше).

7. Наименьшие капитальные и эксплуатационные затраты.

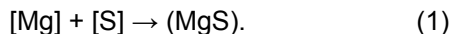
8. Суммарные эксплуатационные затраты при внепечной обработке чугуна должны быть меньше затрат на удаление серы как в доменном, так и сталеплавильном производствах.

9. Исключение пылегазовых и других вредных выбросов.

В тоже время практика промышленного применения различных технологий десульфурации чугуна [1–3, 6–9] свидетельствует о недостаточной эффективности и стабильности в целом ряде случаев.

Выполненные авторами достаточно обширные исследования и тщательный анализ свидетельствуют о том, что разработчики процессов рафинирования весьма упрощенно представляли механизм обменных процессов, не учитывали комплексность всех процессов и, как следствие, не обеспечивали наиболее рациональные условия и параметры реализации технологии. Поэтому при выборе наиболее рациональных решений необходимо учитывать как термодинамику и кинетику обменных процессов, так и в обязательном порядке гидро- и аэродинамику в наиболее активной прифурменной зоне, особенно в области истечения двухфазного потока с реагентом.

Термодинамический анализ реакций взаимодействия различных веществ с серой чугуна [6] свидетельствует о том, что наиболее предпочтительными реагентами для десульфурации чугуна являются оксид кальция и магний (рис. 1), так как обеспечивают наиболее высокие значения (абсолютные) изменения энергии Гиббса. Важнейшим достоинством магния является способность насыщать чугун. Поэтому реакция его взаимодействия с растворенной в чугуне серой протекает не в зоне ввода его в расплав, но и во всем объеме рафинируемой ванны:



Этим обеспечиваются возможности обеспечения высокой степени усвоения магния и наибольшая скорость удаления серы из чугуна.

Взаимодействие оксида кальция (CaO) с серой чугуна протекает обязательно с участием восстановителя (В), который должен «отобрать» кислород оксида кальция и образовать окиси (ВО):



В роли восстановителя в этом процессе могут участвовать как компоненты рафинируемого чугуна [Mn], [C], [Si], так и вводимые в чугун извне, например Al и Mg. Последний вариант является более предпочтительным, так как сопровождается наибольшим изменением энергии Гиббса (см. рис. 1).

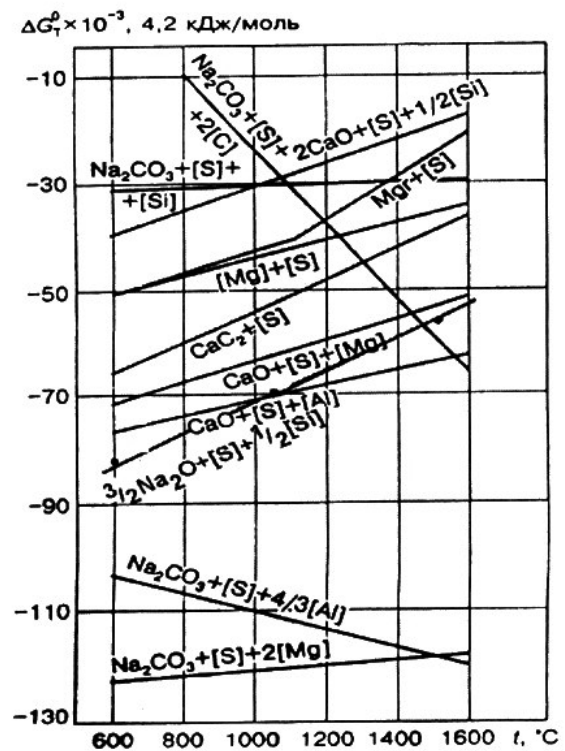


Рис. 1. Изменение величин энергии Гиббса при различной температуре чугуна для различных реакций взаимодействия основных реагентов с серой [6]

Сопоставление расчетных удельных расходов различных восстановителей (рис. 2) свидетельствует, что применение магния и марганца чугуна представляется наименее рациональным, так как сопровождается наибольшими удельными расходами.

При использовании магния для десульфурации чугуна он может взаимодействовать с серой расплава как в газообразном состоянии $\{\text{Mg}\}_{\text{газ}}$, так и в растворенном виде $[\text{Mg}]_{\text{раств}}$. В первом случае магний может «работать» лишь в прифурменной зоне при всплывании пузырей, содержащих магний. Поэтому в этом варианте реализуется весьма нерациональный механизм массообменных процессов.

Если обеспечить благоприятные условия для растворения и насыщения чугуна магнием, то процесс его взаимодействия с серой чугуна активизируется не только в прифурменной зоне, но и во всем объеме ванны, куда перемещаются массы чугуна, содержащие магний растворенный.

Для насыщения чугуна магнием имеются ряд благоприятных условий. Так, если система $[\text{Mg}] - [\text{S}]$ находится в состоянии равновесия, то содержание $[\text{Mg}]$ может составлять (в зависимости от температуры и содержания серы) в основе от 0,002 до 0,050 % [6] (рис. 3).

Вместе с тем в этих же условиях предельные величины насыщения чугуна магнием значительно больше.

Так расчетные значения насыщенного содержания магния в чугуне $[\text{Mg}]_{\text{нас}}$, по выражению Мариичек – Вороновой [10], изменяется в пределах 0,2–2,3 %, а в основных условиях десульфурации

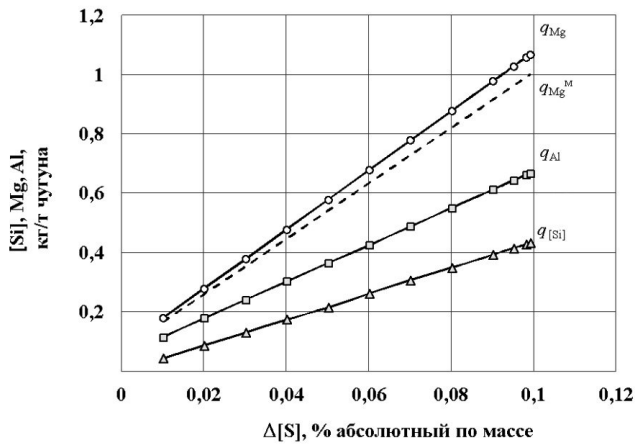


Рис. 2. Расчетные (стехиометрические) удельные расходы различных восстановителей в реакциях взаимодействия оксида кальция с серой чугуна. Усвоение вводимых Al и Mg принято 80 %

0,3–1,4 % (рис. 4), что практически на 2 порядка больше, чем $[Mg]_{\text{равн}}$.

Экспериментальная проверка данных промышленных обработок чугуна вдуванием зернистого магния в различные ковши подтверждает приведенный выше теоретический прогноз. При соблюдении рекомендованных параметров вдувания зернистого магния в большинстве обработок чугуна содержание магния в чугуне после рафинирования превы-

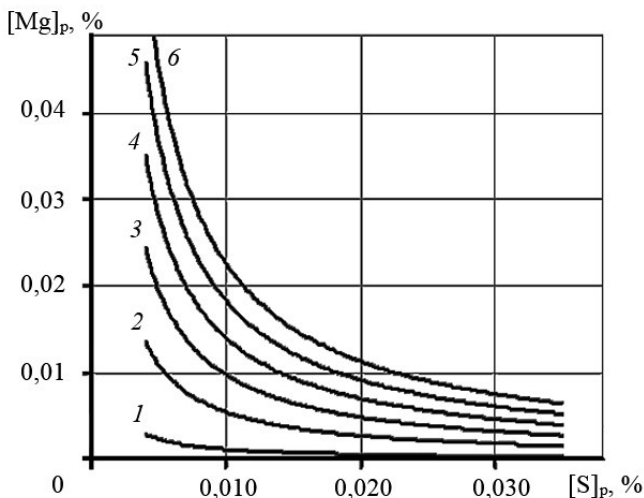


Рис. 3. Зависимость равновесного содержания магния $[Mg]_{\text{равн}}$ в чугуне от содержания серы $[S]$ при температуре чугуна: 1 – 1250 °C; 2 – 1300 °C; 3 – 1350 °C; 4 – 1400 °C; 5 – 1450 °C

шает равновесные значения системы равновесия $[Mg] - [S]$ (рис. 5). Последнее обеспечивает устойчивость и надежность процесса десульфурации чугуна моноинжекцией зернистого магния.

Более тщательный анализ результатов экспериментов показал, что колебание значений $[Mg]_{\text{факт.}}$ в основе обусловлен изменением температуры чугуна перед обработкой. При колебаниях температуры в пределах ± 10 °C значение $[Mg]_{\text{факт.}}$ стабилизируется, но, как правило, выше $[Mg]_{\text{равн.}}$ на 0,004–0,01 %, чем $[Mg]_{\text{равн.}}$ (рис. 6). Вместе с тем предельное насыщение чугуна магнием в этих условиях значительно больше указанных величин. $[Mg]_{\text{равн.}}$ и $[Mg]_{\text{факт.}}$ так как состав-

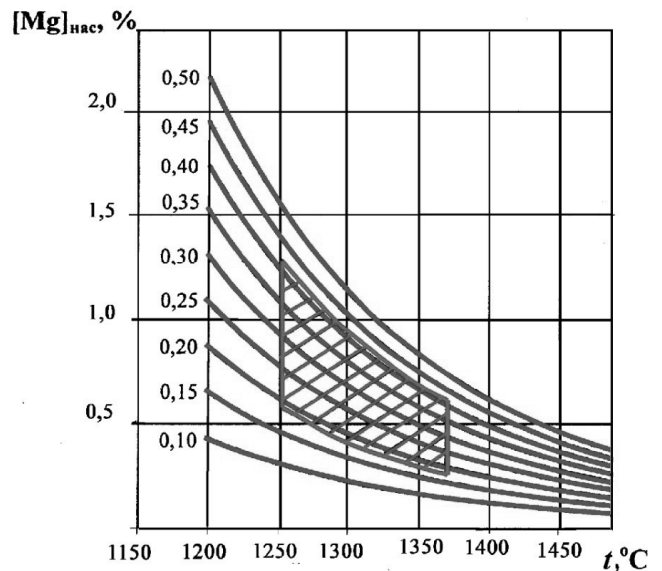


Рис. 4. Зависимость насыщения чугуна магнием ($[Mg]_{\text{насыщ}}$) от температуры (t) чугуна. Цифры у кривых – давление в исследуемой зоне (МПа), заштрихованная область – зона наиболее характерных параметров ввода магния в жидкий чугун в ковше

ляет около 1,1 %, то есть расплав чугуна остался способным принимать магний, увеличивая $[Mg]$ насыщенный.

Вторым весьма ответственным вопросом при инжекционной десульфурации чугуна является гидро- и аэродинамическая обстановка в зоне истечения двухфазного потока из фурмы в расплав чугуна, так

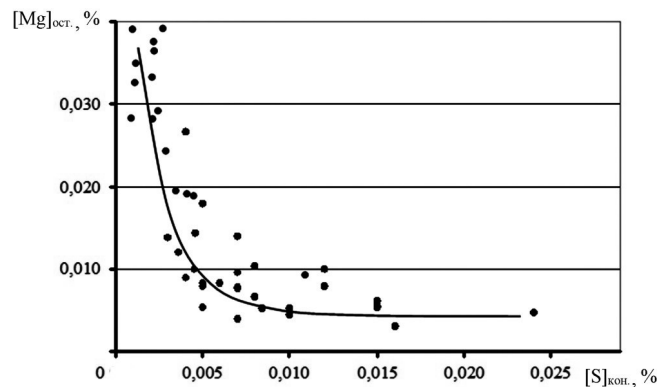


Рис. 5. Значения фактического содержания магния в чугуне ($[Mg]_{\text{факт.}}$) при различных содержаниях серы ($[S]_{\text{факт.}}$) после вдувания сернистого магния. о – точки $[Mg]_{\text{факт.}}$; — кривая — $[Mg]_{\text{равн.}}$; Температура чугуна 1290–1360 °C.

как необходимо обеспечить внедрение частиц реагента в жидкую ванну для взаимодействия с серой чугуна.

При математическом моделировании процессов взаимодействия двухфазных струй с жидким чугуном получены номограммы внедрения частиц различных реагентов в жидкий чугун. Одна из них представлена на рис. 7, из которого следует, что (рис. 7, а) скорость движения частиц и их диаметр являются важнейшими параметрами для всех реагентов и, особенно при выборе технологии их ввода в расплав.

Для всех типоразмеров частиц скорость движения

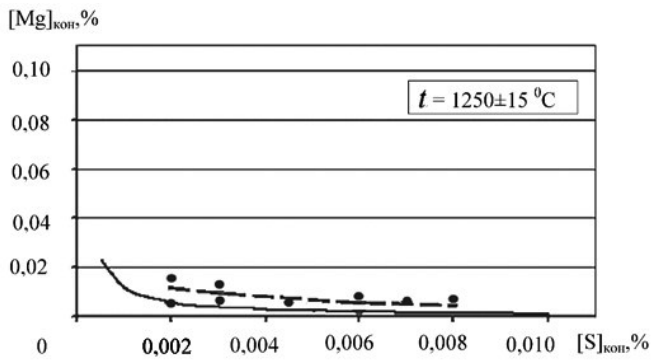


Рис. 6. Изменение величины равновесного содержания магния $[Mg]_{\text{равн}}$ и фактического $[Mg]_{\text{факт}}$ в чугунах после вдувания магния: — (кривая) — $[Mg]_{\text{равн}}$; - - - (точки) — $[Mg]_{\text{факт}}$.

меньше 30 м/с является нерациональной, так как сопровождается резким уменьшением глубины внедрения частиц в расплав чугуна (рис. 7, а). При вдувании порошкообразных молотых реагентов с диаметром частиц $< 0,8$ мм частицы практически не внедряются в расплав чугуна (рис. 7, б). Последнее обуславливает создание обстоятельств, при которых порошковые реагенты остаются в газовой среде, образуя в расплаве чугуна высококонцентрированные скопления вдуваемого реагента. Такое явление является нежелательным, так как сопровождается резким уменьшением активной поверхности вводимого реагента.

Из приведенного следует вывод о том, что при вдувании зернистых реагентов с диаметром частиц более 0,4 мм параметр скорости является определяющим, так как обеспечивает возможность внедрения частиц реагента в расплав чугуна на глубину вплоть до 20–25 мм (см. рис. 7, а). При вдувании же порошковых молотых реагентов с мелкодисперсными частицами ($d \leq 0,1$ мм в основе) возникают условия, когда частицы ввиду небольшой кинетической энергии незначительно внедряются в расплав, а накапливаются в прифурменной зоне, образуя высококонцентрированные скопления с диаметром до 120 мм [11] с ограниченной активной поверхностью. В этом случае необходимо реализовать дополнительные меры по

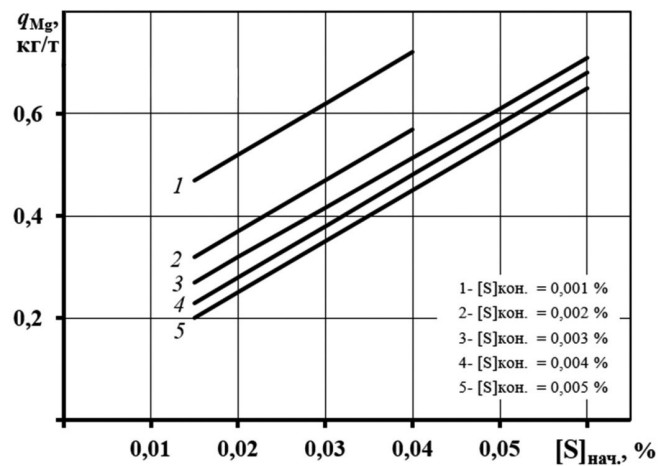


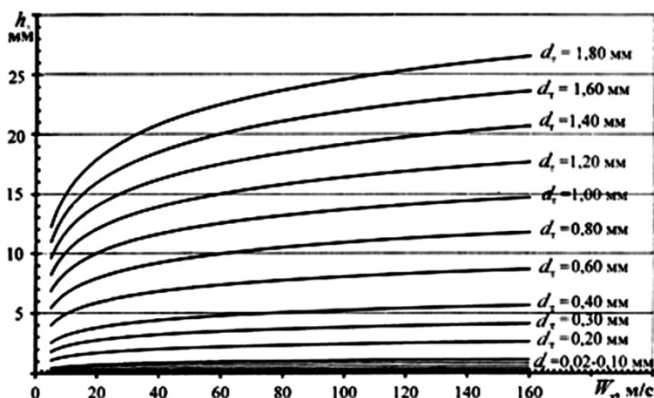
Рис. 8. Удельный фактический расход магния при моноинжекции зернистого магния в заливочных ковшах с массой чугуна более 150 т

дроблению этих образований (для увеличения активной поверхности реагента в расплаве).

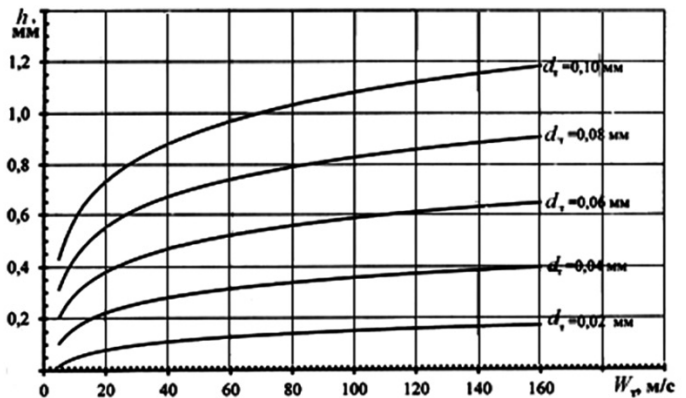
Из приведенных результатов исследований следуют выводы в том, что для каждого применяемого реагента имеется свой наиболее рациональный механизм процесса и технологическая схема реализации.

Так в случае применения немагниевого реагента, например, молотой извести, необходимо индивидуально вводить в расплав чугуна Al. При вдувании извести в двухфазный поток необходимо вводить добавки, которые, не мешая процессу взаимодействия оксида кальция с серой, активно (взрывным характером) образовывали дополнительно газы и пары, этим разрывая скопления реагентов в зоне истечения струи из фурмы. Процесс вдувания осуществляется при концентрации порошка в газе 40–60 кг/м³ [6].

При десульфурации магниесодержащим реагентом необходимо применять зернистый магний с диаметром частиц 0,3–1,5 мм. Пассивирующие и другие пассивирующие добавки исключаются. Процесс вдувания осуществляют в струе сухого азота и скорости на выходе из фурмы более 80 м/с. Этим



а



б

Рис. 7. Зависимость глубины внедрения (h) частиц реагентов в жидкий чугун от диаметра частиц (d_i) и частиц и скорости движения (W_p): а – при диаметре частиц от 0,05 до 1,6 мм; б – при диаметре частиц от 0,02 до 0,10 мм

обеспечивается надежное внедрение частиц магния в расплав чугуна и высокое парциальное давление магния в реакционной зоне.

Экспериментальная, опытная и промышленная проверка приведенных выше рекомендаций подтвердили их высокую рациональность. Так при десульфурации чугуна оксидом кальция, ввод в ковш Al, уменьшение концентрации извести в газе до 50 кг/нм³, добавка к извести твердого газообразующего, использование диссоциирующего газа повысили степень десульфурации чугуна с 50–85 до 80–96 %, в том числе получение чугуна с содержанием серы ≤ 0,004–0,005 %.

При десульфурации чугуна моноинжекцией зернистого магния увеличена вдвое интенсивность ввода магния – вплоть до 25 кг/мин, увеличена скорость удаления серы и обеспечена гарантированная глубокость (≤ 0,005 %) и особо глубокая (≤ 0,001 %) десульфурация чугуна (рис. 8).

Результаты приведенной расчетно-аналитической разработки рекомендуются к использованию в новых и модернизируемых объектах внепечной десульфурации чугуна.

Выводы

1. При разработке и освоении процессов внепечной десульфурации чугуна различными реагентами

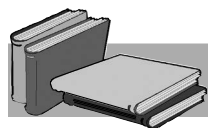
необходимо учитывать, что все применяемые технологии имеют резервы для существенного улучшения показателей десульфурации, в том числе за счет оптимизации условий термодинамики, кинетики и гидро- и аэродинамики обменных процессов.

2. Имеющиеся резервы модернизации процессов следует разделить на группы магниевых и немагниевых реагентов, использование каждой имеет индивидуальные особенности.

3. При десульфурации немагниевыми реагентами (в основе это оксидом кальция – известью) процесс вдувания должен осуществляться с индивидуальным вводом в чугун Al. Во вдуваемый двухфазный поток вводится добавка, которая на выходе из фурмы в расплав взрывообразным характером испаряется и разрушает скопление порошка, увеличивая активную поверхность десульфурации в чугуне и рассредоточивая порошок в расплаве.

4. При десульфурации магнием должен применяться зернистый магний с диаметром частиц 0,3–1,6 мм и без разубоживающих и пассивирующих добавок. При скорости на выходе из фурмы более 50 м/с обеспечивается надежное вдувание магния с интенсивностью подачи до 25 кг/мин.

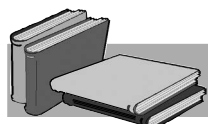
5. Разработанные предложения и рекомендации проверены в промышленных условиях. Обеспечивается степень десульфурации вплоть до 95–99 %.



ЛИТЕРАТУРА

1. Шевченко А.Ф., Большаков В.И., Башмаков А.М. Технология и оборудование десульфурации чугуна магнием в больших ковшах. Киев: Наукова думка, 2017. 205 с.
2. Степанов А.А., Зинченко С.Д., Ламухин А.И. и др. Освоение технологии производства стали с использованием установки десульфурации чугуна в условиях конвертерного производства ОАО «Северсталь». М.: *Черная металлургия: Бюл. ин-та «Черметинформация»*. 2005. № 4. С. 31–33.
3. Ушаков С.Н., Авраменко В.Л., Бичеев В.А., Столяров А.М., Потапова М.В. Производство трубной низкосернистой стали с ковшевой десульфурацией чугуна. М.: *Металлург*. 2017. № 11. С. 47–61.
4. Кудрин В.А. Внепечная обработка чугуна и стали. М.: Металлургия, 1992. 335 с.
5. Найдек В.Л. Повышение эффективности металлургических технологий внепечной обработки железоуглеродистых расплавов. Сб. докладов международной конференции. Производство стали в XXI веке. Прогнозы. Процессы, технологии, экономика. Киев: ЗАО «Укрсплав», 2000. С. 16–23.
6. 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.
7. R. Hüskens, J. Kappel Стратегия десульфурации в кислородно-конвертерном производстве стали. Металлургическое производство. Технология (MPT). М.: VERLAG STANLEY STEN GMBH. Издательский дом «Руда и металлы». 2013. № 1. С. 28–38.
8. Зборщик А.М., Кубарский С.В., Косолап И.В. Эффективность использования извести в современных процессах внепечной десульфурации чугуна. М.: *Бюллетень «Черная металлургия»*. 2011. № 12. С. 35–41.
9. Nadif M., Suero I., Rodesly C. Методы десульфурации на предприятиях Arcelor Mittal Fiat Western Europe. М.: *Новости черной металлургии за рубежом*. 2010. № 3. С. 32–34.
10. Воронова Н.А. Десульфурация чугуна магнием. М.: Металлургия, 1982. 205 с.
11. Охотский В.Б. Физико-химическая механика сталеплавильных процессов. М.: Металлургия, 1993. 191 с.

Поступила 14.10.2019



REFERENCES

1. Shevchenko, A.F., Bolshakov, V.I., Bashmakov, A.M. (2017). Technology and equipment for the desulfurization of cast iron by magnesium in heavy duty buckets. Kyiv: Naukova Dumka, 205 p. [in Russian].
2. Stepanov, A.A., Zinchenko, S.D., Lamukhin, A.I. et al. (2005). Mastering the technology of steel production using a pig iron desulfurization unit in the conditions of the converter production of OJSC Severstal. Moscow: *Ferrous metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economical Information*, no. 4, pp. 31–33 [in Russian].
3. Ushakov, S.N., Avramenko, V.L., Bicheev, V.A., Stolyarov, A.M., Potapova, M.V. (2017). Production of mild steel pipe with ladle desulfurization of cast iron. Moscow: *Metallurg*, no. 11, pp. 47–61 [in Russian].
4. Kudrin, V.A. (1992). Out-of-furnace treatment of cast iron and steel. Moscow: *Metallurgiya*, 335 p. [in Russian].
5. Naidek, V.L. (2000). Improving the efficiency of metallurgical technologies for out-of-furnace treatment of iron-carbon melts. *Collection of reports of the international conference. Steel production in the twenty-first century. Forecasts. Processes, technologies, economics*. Kyiv: Ed. CJSC "Ukrsplyv", pp. 16–23 [in Russian].
6. Shevchenko, A.F., Manachin, I.A., Vergun, A.S. et al. (2017). Out-of-furnace desulfurization of cast iron in ladles. Technology. Research. Analysis. Perfection. Dnipro: "Dnipro-VAL", 253 p. [in Russian].
7. Hüsken, R., Kappel, J. (2013). Desulfurization Strategy in Oxygen Converter Steel Production. Metallurgical industry. Technology (MRI). Moscow: Ed. VERLAG STAHLSTEN GMBH. Publishing House "Ore and Metals", no. 1, pp. 28–38 [in Russian].
8. Zborschik, A.M., Kubersky, S.V., Kosolap, I.V. (2011). Efficiency of lime use in modern processes of non-specified cast iron desulfurization. Moscow: *Ferrous metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economical Information*, no. 12, pp. 35–41 [in Russian].
9. Nadif, M., Suero, I., Rodesly, C. (2010). Desulfurization Methods at Arcelor Mitall Flat Western Europe. Moscow: *Ferrous metallurgy news abroad*, no. 3, pp. 32–34 [in Russian].
10. Voronova, N.A. (1982). Desulfurization of cast iron by magnesium. Moscow: *Metallurgiya*, 205 p. [in Russian].
11. Okhotsky, V.B. (1993). Physico-chemical mechanics of steelmaking processes. Moscow: *Metallurgiya*, 191 p. [in Russian].

Received 14.10.2019

Анотація

А.П. Шевченко, д-р техн. наук, проф., пров. наук. співр., e-mail: ovoch-isi@outlook.com, <https://orcid.org/0000-0003-0867-6825>; **І.О. Маначин**, канд. техн. наук, ст. наук. співр., e-mail: ovoch-isi@outlook.com, <https://orcid.org/0000-0001-9795-6751>; **Б.В. Двоскін**, канд. техн. наук, ст. наук. співр., e-mail: ovoch-isi@outlook.com, <https://orcid.org/0000-0003-2891-7833>; **В.Г. Кисляков**, канд. техн. наук, ст. наук. співр., зав. відділу, e-mail: ovoch-isi@outlook.com, <https://orcid.org/0000-0002-1775-5050>; **С.А. Шевченко**, канд. техн. наук, ст. наук. співр., e-mail: ovoch-isi@outlook.com, <https://orcid.org/0000-0002-9289-9177>; **В.І. Єлісєєв**, канд. фіз.-мат. наук, ст. наук. співр., ст. наук. співр., e-mail: ovoch-isi@outlook.com; **О.С. Вергун**, д-р техн. наук, ст. наук. співр., ст. наук. співр., e-mail: ovoch-isi@outlook.com, <https://orcid.org/0000-0001-5493-9214>; **О.В. Остапенко**, наук. співр., e-mail: ovoch-isi@outlook.com

Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України (Дніпро, Україна)

Теоретичні та технологічні основи обмінних процесів при інжекційній десульфурзації чавуну різними реагентами

Представлено результати розрахунково-аналітичних розробок для реалізації найбільш раціонального механізму різних технологій десульфурзації чавуну на основі вдування вапна і магнеїю. Показано, що шляхи реалізації раціональних рішень і механізмів цих процесів різні. При вдуванні оксиду кальцію необхідно організувати хімічну взаємодію за участю внесеного ззовні Al, а також руйнування і диспергування зони закінчення потоку з фурми в чавун за допомогою газоутворюючих в чавуні добавок. Зіставлення розрахункових питомих витрат різних відновників свідчить, що застосування магнеїю і марганцю чавуну представляється найменш раціональним, через те що супроводжується найбільшими питомими витратами. Для всіх типорозмірів частинок швидкість руху менше 30 м/с є нераціональною, оскільки супроводжується різким зменшенням глибини впровадження частинок в розплав чавуну. Показано, що при вдуванні порошкоподібних мелених реагентів з діаметром частинок $< 0,8$ мм, частинки практично не занурюються в розплав чавуну. Таке явище є небажаним, бо супроводжується різким зменшенням активної поверхні реагенту, що вводиться. При моноінжекції магнеїю необхідно забезпечити зернистий склад реагенту і високу (більше 80 м/с) швидкість витікання потоку в розплав чавуну. При вдуванні зернистих реагентів з діаметром частинок більше 0,4 мм параметр швидкості є визначальним, тому що забезпечує можливість занурення частинок реагенту в розплав чавуну на глибину аж до 20–25 мм. При дотриманні рекомендованих параметрів вдування зернистого магнеїю в більшості обробок чавуну вміст магнеїю в чавуні після рафінування перевищує рівноважні значення системи рівноваги $[Mg] - [S]$. Останнє забезпечує стійкість і надійність процесу десульфурзації чавуну моноінжекцією зернистого магнеїю. Забезпечується ступінь десульфурзації до 95–99 %. Теоретичні положення підтверджено експериментально.

Ключові слова

Магній, вапно, інжекція, десульфурация, ефективність десульфурзації, швидкість частинок.

Summary

A.F. Shevchenko, Dr. Sci. (Engin.), Professor, Leading Researcher, e-mail: ovojch-isi@outlook.com, <https://orcid.org/0000-0003-0867-6825>;
I.A. Manachin, PhD (Engin.), Senior Researcher, e-mail: ovojch-isi@outlook.com, <https://orcid.org/0000-0001-9795-6751>; **B.V. Dvoskin**, PhD (Engin.), Senior Researcher, e-mail: ovojch-isi@outlook.com, <https://orcid.org/0000-0003-2891-7833>; **V.G. Kisliakov**, PhD (Engin.), Senior Researcher, Head of Department, e-mail: ovojch-isi@outlook.com, <https://orcid.org/0000-0002-1775-5050>; **S.A. Shevchenko**, PhD (Engin.), Senior Researcher, e-mail: ovojch-isi@outlook.com, <https://orcid.org/0000-0002-9289-9177>; **V.I. Eliseev**, PhD (Phys. & Math.), Senior Research Scientist, Senior Researcher, e-mail: ovojch-isi@outlook.com
A.S. Vergun, Dr. Sci. (Engin.), Senior Research Scientist, Senior Researcher, e-mail: ovojch-isi@outlook.com, <https://orcid.org/0000-0001-5493-9214>; **A.V. Ostapenko**, Researcher, e-mail: ovojch-isi@outlook.com

Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov of the NAS of Ukraine (Dnipro, Ukraine)

Theoretical and technological bases of exchange processes during injection desulfurization of hot metal with various reagents

The results of calculation and analytical developments for the implementation of the most rational mechanism of various technologies of desulfurization of hot metal based on the injection of lime and magnesium are presented. It is shown, that the ways of implementing rational decisions and the mechanism of these processes are different. When blowing calcium oxide, it is necessary to organize a chemical interaction with the participation of Al introduced from outside, as well as the destruction and dispersion of the zone of flow from the lance into hot metal using gasforming additives in cast iron. A comparison of the calculated costs of various reducing agents indicates that the use of magnesium and hot metal manganese seems to be the least rational, since it is accompanied by the highest costs. For all particle sizes, a velocity of less than 80 m/s is irrational, since it is accompanied by a sharp decrease in the depth of particle penetration into the molten iron. It is shown, that when blowing powdered reagents with a particle diameter of < 0.8 mm, particles practically do not penetrate into the molten iron.

This phenomenon is undesirable, as it is accompanied by a sharp decrease in the active surface of the introduced reagent. In the case of mono-injection of magnesium, it is necessary to ensure a granular composition of the reagent and a high (more than 50 m/s) flow rate into the molten iron. When granular reagents with particle diameters of more than 0.4 mm are blown in, the velocity parameter is decisive, since it provides the possibility of introducing reagent particles into the hot metal to a depth of up to 20–25 mm. In accordance with the recommended parameters for the injection of granular magnesium in most hot metal treatments, the magnesium content in cast iron after refining exceeds the equilibrium values of the equilibrium system [Mg] – [S]. The latter provides stability and reliability of the process of hot metal desulfurization by mono-injection of granular magnesium. The degree of desulfurization is up to 95–99 %. Theoretical provisions are confirmed experimentally.

Keywords

Magnesium, lime, injection, desulfurization, desulfurization efficiency, particle velocity.

И.Ю. Приходько¹, д-р техн. наук, ст. науч. сотр., зав. отделом, e-mail: isi@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-5651-8106>

С.А. Воробей¹, д-р техн. наук, ст. науч. сотр., ст. науч. сотр., e-mail: vso54@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0003-0119-3935>

С.В. Мацко², начальник цеха горячей прокатки тонкого листа, e-mail: sergey.matsko@zaporizhstal.com

В.С. Панченко², начальник отдела по горячему прокату Дирекции по технологии и качеству Технического управления, e-mail: v.st.panchenko@zaporizhstal.com

¹Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины (Днепр, Украина)

²ПАО «Металлургический комбинат «Запорожсталь» (Запорожье, Украина)

Повышение эффективности системы охлаждения валков широкополосного стана горячей прокатки (ШСГП) 1680

Проведено обследование системы охлаждения рабочих валков чистовой группы клетей широкополосного стана горячей прокатки (ШСГП) 1680. Показано, что температура валков после прокатки полос составляет 40–80 °С. При этом максимальные значения температуры (65–80 °С) наблюдаются в первых трех клетях чистовой группы. Определены размеры зон охлаждения валков водой (19–38° для однорядных коллекторов и 58–90° для двухрядных) и их расположение по окружности валков всех клетей чистовой группы, а также расстояния от форсунок до поверхности валков (200–350 мм при номинальном 200 мм). Установлены особенности распределения температур верхних и нижних валков по клетям чистовой группы и по длине бочки валков во взаимосвязи с режимами прокатки полос и условиями подачи охладителя на поверхность валков. Определено, что увеличение погонной силы прокатки (на метр ширины полосы) от 5 до 15 МН/м повышает температуру валков на 20–25 °С. Методами математического моделирования оценена возможность снижения температуры валков за счет модернизации системы их охлаждения, в частности: корректировка углов наклона форсунок в коллекторах – на 2 °С; замена однорядных коллекторов со стороны входа в клеть на двухрядные без изменения расхода воды – на 4 °С; увеличение расхода воды в одной клетке на 50 м³/ч – на 2–4 °С; увеличение давления воды на 1 атм. – на 1–3 °С; применение подстуживания поверхности полос перед входом в очаг деформации дополнительным объемом воды – на 4 °С. Для малозатратного повышения эффективности охлаждения валков предложено в первых трех клетях заменить однорядные коллекторы охлаждения со стороны входа в клетки на двухрядные с сохранением общего расхода воды за счет подбора типа форсунок. Экспериментальное среднее снижение температуры валков составило не менее 4 °С. Эффективность модернизации подтверждена уменьшением фактического удельного расхода валков и увеличением средней удельной наработки вала.

Ключевые слова: температура рабочих валков, параметры прокатки полос, модернизация системы охлаждения.

В последние годы, в связи с возрастающими требованиями к качеству горячекатаных полос, повышением интенсивности производства, усложнением сортамента, появлением новых материалов и конструкций валков, все большее внимание уделяется оптимизации температурных режимов их эксплуатации [1–3].

Увеличение количества воды для охлаждения валков, как правило, не позволяет коренным образом повысить эффективность работы системы без увеличения давления и рациональной ее подачи на поверхность по окружности валков. Поэтому особое внимание уделяется разработке эффективных способов отвода тепла, в частности, организации эффективной подачи охладителя на поверхность

валков, повышению давления в коллекторах, снижению и стабилизации температуры воды. Возрождаются на новом техническом уровне системы подачи технологической смазки на валки и подстуживания поверхности полосы на входе в очаг деформации (так называемая система антишелушения). При выборе варианта модернизации системы охлаждения валков на действующих станах важно определить наиболее эффективные технические решения, учитывающие сортамент прокатываемых полос, технологические режимы прокатки и параметры основного оборудования стана. Важными вопросами при этом являются определение рационального распределения охладителя по клетям чистовой группы, по зонам окружности валков, по длине бочки.

Цель настоящей работы – выявить недостатки существующей системы охлаждения рабочих валков клетей чистовой группы ШСГП 1680 ПАО «Металлургический комбинат «Запорожсталь» и разработать возможные варианты повышения ее эффективности.

Методика проведения исследований основана на разработанной ранее в Институте черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины методологии научно-технического аудита системы охлаждения валков широкополосного стана горячей прокатки [4] и включает следующие основные этапы:

- сбор информации о параметрах существующей системы подачи охладителя, в том числе: общий расход охладителя и расход по клетям, температура и давление в подводящей магистрали, качество охладителя;
- сбор информации о конфигурации системы охлаждения в каждой клетке, параметрах коллекторов, их расположении относительно валков, количестве и типах форсунок, включая их напорно-расходные характеристики, давление в коллекторах;
- анализ существующего и перспективного сортамента стана с позиций влияния на температурный режим эксплуатации валков;
- сбор данных о параметрах прокатки полос, включая режимы деформаций, температурный, скоростной режим прокатки, энергосиловые параметры;
- определение фактической схемы подачи охладителя на валки, состояния форсунок;
- экспериментальные исследования температурного режима эксплуатации валков в зависимости от технологических параметров прокатки полос, цикла прокатки, фактических параметров системы охлаждения валков;
- адаптация математических моделей температурного режима эксплуатации валков;
- разработка, анализ и оценка с помощью математических моделей возможных решений по повышению эффективности системы охлаждения валков;
- экспериментальная проверка разработанных решений и определение фактической их эффективности¹.

Используемые математические модели, разработанные Институтом черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины и ООО «Металлтехно-маш», подробно приведены в работах [5, 6].

Основные результаты. На стане 1680 прокатывают полосы толщиной от 1,5 до 10 мм, шириной от 860 до 1520 мм, массой до 16,5 т, в основном, из низкоуглеродистых сталей. Чистовая группа включает шесть клетей кварто (№ 5–10) с диаметром рабочих валков 585–620 мм. Особенности стана 1680 – применение прямой прокатки слябов (со слябинга без подогрева в печах перед станом) и использование промежуточного перемоточного устройства (ППУ) коилбокс перед чистовой группой клетей. Применение ППУ приводит к тому, что в чистовую группу раскат задается задним концом вперед, а верхняя и нижняя стороны раската меняются местами. Практически устраняется системный температурный клин по дли-

не раскатов на входе в чистовую группу и прокатанных полос.

Как показывают наши исследования, при близких параметрах охлаждения верхних и нижних валков чистовой группы клетей на ШСГП, не оснащенных ППУ, температура нижних валков, как правило, на 2–5 °С больше, чем верхних. На станах с ППУ, наоборот, температура верхних валков больше, чем нижних.

Толщина раскатов перед чистовой группой – от 19 до 25 мм. Максимальная скорость прокатки полос – 8–8,5 м/с.

Основные параметры системы охлаждения рабочих валков чистовой группы следующие (подача воды на опорные валки не производится):

- общий расход воды – до 4200 м³/ч;
- температура охлаждающей воды – 21–30 °С;
- давление воды в подводящей магистрали перед раздвоением для подачи в группу клетей № 5–7 (Ø 600 мм) и 8–10 (Ø 500 мм) составляет 6–6,6 атм.

Количество рядов форсунок: в клетях № 5–10: на входе – один, на выходе – два; в клетях № 10 установлен дополнительный однорядный коллектор сверху на выходе, который может открываться вальцовщиком при необходимости для воздействия на плоскостность полос. Количество форсунок в коллекторах без учета дополнительного коллектора в клетях № 10 приведено в табл. 1.

В системе охлаждения валков (СОВ) используется два типа форсунок фирмы Лехлер – модели 665.124.17 со стороны входа каждой клетки (99,6 л/мин при давлении 5 атм.) и 665.204.17 со стороны выхода каждой клетки (158 л/мин при 5 атм.). Номинальный угол раскрытия факела 60°, фактический угол 68,43° на расстоянии от сопла форсунки 250 мм. Фактическое соотношение сторон раскрытия факела (5–8):1.

Углы наклона плоскости факелов форсунок к оси коллекторов в однорядных коллекторах клетей № 5, 6, 9, 10 – 35°, № 7, 8 – 30°. Углы наклона плоскости факелов форсунок к оси коллекторов в двухрядных коллекторах клетей № 5, 6 – 45°, № 7 – 50°, № 8, 9, 10 – 40°.

Соотношение расхода воды на верхние и нижние валки 50/50 %, со стороны входа и выхода – 25/75 % (без учета дополнительного коллектора клетки № 10).

Измеренное распределение расхода воды на охлаждение рабочих валков по клетям № 5–10 составило, соответственно: 700–745; 756–803; 737–778; 689–727; 626–659; 467–511 м³/ч. Измеренные величины давления в коллекторах охлаждения рабочих валков составили от 4,0 до 6,2 атм.

Изготовление коллекторов охлаждения весьма точное, разориентация форсунок минимальна. Параллельность коллекторов валкам высокая. Конфигурация (шаг, углы наклона, расстояния между рядами и сдвиг форсунок в рядах двухрядных коллекторов) приемлемы и обеспечивают равномерность погонного расхода охладителя в пределах 5 %. В то же время начало зоны охлаждения на поверхности валков со стороны выхода из клетки существенно удалено от очага деформации.

1 – при участии Мудрицкого С.А., Линкевича В.Е., Кириллова Д.М., Литвишкова И.В.

Количество форсунок в коллекторах

Расположение коллектора	Количество форсунок в коллекторе по клетям					
	5	6	7	8	9	10
Вход верх	16	16	14	14	12	11
Вход низ	16	16	14	14	11	11
Выход верх	31	31	27	27	21	21
Выход низ	31	31	27	27	21	21
Всего форсунок	94	94	82	82	65	64

Состояние загрязненности форсунок в ходе обследования свидетельствует об удовлетворительном состоянии фильтров, которые установлены перед насосами. По всей чистовой группе были обнаружены всего лишь 5 форсунок с признаками перекрытия проходного отверстия металлическими или неметаллическими частицами.

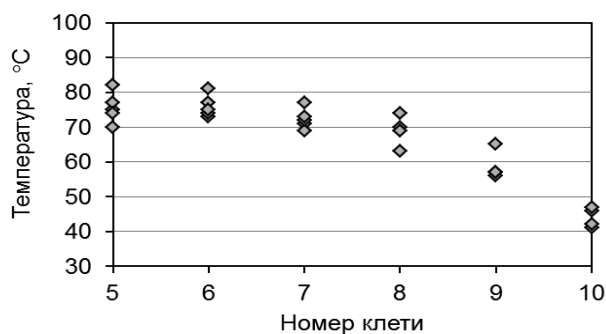
Результаты замеров температуры валков, выполненных непосредственно после их вывалки (после прокатки полос толщиной 1,9–3,2 мм), показаны на рис. 1. Температура охлаждающей воды 21–23 °С.

Измерения температуры валков показали, что в пятой клети разброс температуры между верхним и нижним рабочим валком составлял 3–6 °С, причем более высокая температура в разных случаях была зафиксирована как на верхнем, так и на нижнем вал-

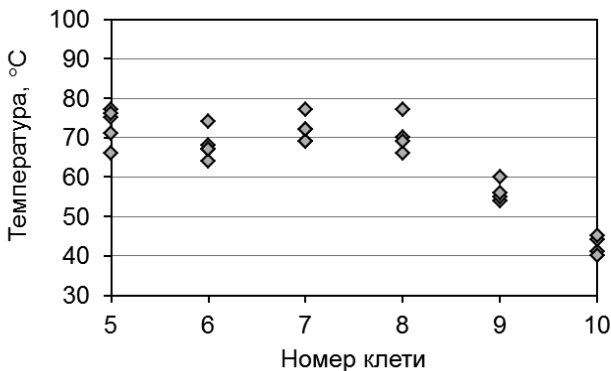
ках. В шестой клети температура верхнего рабочего валка по всем результатам измерения была выше, чем температура нижнего валка на 4–10 °С. В седьмой клети разность температур минимальна. В восьмой клети нижние валки горячее верхних до 3 °С. В девятой клети температура верхнего валка была выше на 2–5 °С. В десятой клети верхние валки горячее нижних примерно на 2 °С.

Такое соотношение температур верхних и нижних валков клетей № 8–10 является одной из причин их различного износа – величины максимального износа составили (мм; верх/низ): клеть № 8 – 0,184/0,086; клеть № 9 – 0,12/0,05; клеть № 10 – 0,082/0,027.

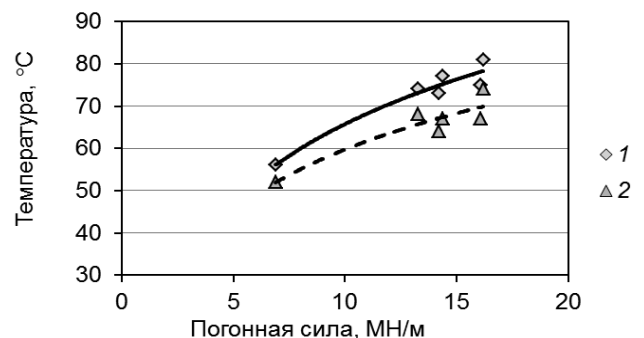
Температура валков на участках, соответствующих прокатке прикромочных участков полос, различается со стороны привода и обслуживания на



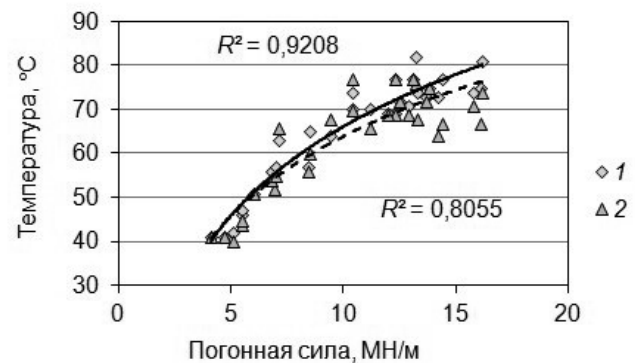
Верхние валки



Нижние валки



а



б

Рис. 1. Измеренная температура валков по клетям чистовой группы

Рис. 2. Влияние погонной силы прокатки на температуру верхних (1) и нижних (2) валков клети № 6 (а) и всех клетей чистовой группы (б)

1–11 °С. При этом более высокая температура валков наблюдается в различных случаях как с приводной стороны, так и со стороны обслуживания.

Имеют место локальные (на длине до 200 мм) перепады температуры (до 8–9 °С) по длине бочки верхнего и нижнего рабочих валков пятой клетки. Это может вызывать локальную неравномерность их износа (по нашим оценкам 10–20 мкм) в соответствующем месте.

Сопоставительный анализ температур валков и параметров прокатки показал значительное влияние расчетной погонной (на метр ширины полосы) силы прокатки (фактическая сила прокатки на стане не измеряется). Результаты представлены на рис. 2.

Проведенные измерения износа рабочих валков показали, что имеет место закономерность повышенного износа верхних рабочих валков со стороны завалки. Поскольку температурные поля этих валков не имеют асимметрии, и эта закономерность износа имеет место только на верхних валках, то наиболее вероятной причиной является односторонний скос на верхних опорных валках со стороны привода. Это вызывает повышенную межвалковую нагрузку и износ с неприводной стороны.

Замеры взаимной ориентации коллекторов, форсунок охлаждения, отсекаелей, проводок и валков позволили определить центральные углы орошения на валках (рис. 3, табл. 2) и уточнить расстояния от форсунок до поверхности рабочих валков в клетях стана. Проектное расстояние от форсунок до поверхности валков – 200 мм, что можно считать рациональным, однако выполненные замеры показали, что фактическое расстояние составляет от 200 до 350 мм.

Полученные в ходе обследования СОВ данные использованы для расчета температуры рабочих валков по разработанным ранее компьютерным программам. Погрешность расчета не превышала ± 5 °С, что позволило расчетным путем определять эффективность различных вариантов повышения эффективности охлаждения валков.

Рассмотрены следующие варианты возможного повышения эффективности охлаждения валков клетей № 5–7 (наиболее теплонагруженных):

1. Изменение углов наклона форсунок в коллекторах.
2. Применение двухрядных коллекторов со стороны входа в клеть.
3. Применение подстуживания поверхности полос перед входом в очаг деформации.
4. Увеличение давления воды в коллекторах.
5. Увеличение расхода воды на охлаждение валков.

Из перечисленных мероприятий относительно малозатратными являются первое и второе.

Оценку эффективности указанных мероприятий проводили на примере верхнего валка клетки № 6 при прокатке полос размером 1,9x1000 мм, принятого за базовый. Расчетная температура базового варианта – 74,9 °С.

Увеличение углов наклона позволяет увеличить

угол зоны орошения валка при некотором снижении равномерности распределения воды по длине бочки. Рассмотрен вариант увеличения угла наклона форсунок со стороны входа до 45°, выхода – до 50°. При реализации данного решения расчетное снижение температуры валка составило 2,1 °С. При изменении угла наклона форсунок только со стороны входа расчетное снижение температуры валка составило 1,0 °С. Предложенное изменение углов наклона не приводит к существенному увеличению неравномерности распределения воды по длине бочки валка.

Применение двухрядных коллекторов вместо однорядных позволяет значительно увеличить угол зоны орошения валка. Для сохранения общего расхода воды на клеть предложено в дополнительном ряду установить 13 форсунок типа 665.124, а в верхнем ряду коллектора со стороны выхода заменить форсунки типа 665.204 на 665.124. При этом номинальный расход воды увеличивается всего на 6 %. Выполненные расчеты показали, что при одинаковом расходе воды и некотором расчетном снижении давления воды в коллекторах за счет увеличения суммарного проходного сечения форсунок расчетное снижение температуры валка составило 3,6 °С. При установке двухрядного коллектора со стороны входа и увеличении углов наклона форсунок до 45 и 50° со сторон входа и выхода, соответственно, расчетное снижение температуры валка составило 4,4 °С.

Применение подстуживания поверхности полос перед входом в очаг деформации за счет уменьшения теплопередачи от полосы в валок позволяет снизить температуру его поверхности, уменьшить термические напряжения и несколько снизить температуру валков. Расчеты показали, что при подстуживании полосы водой с расходом 50 м³/ч на одну сторону ожидаемое снижение температуры валка составляет 4,5 °С (при сохранении постоянным расхода воды на охлаждение валка). Если на подстуживание полосы использовать воду, подаваемую на валок (то есть уменьшить количество воды на охлаждение валка), то при сохранении существующих конструкций коллекторов и типов форсунок, расчетная температура валка практически не изменилась бы.

Увеличение давления воды в коллекторах – эффективное, но затратное техническое решение, так как требует замены насосов, а в некоторых случаях – и форсунок.

Увеличение расхода воды на охлаждение валков требует еще больших капитальных вложений – замена насосов, реконструкция всего цикла подачи, отвода и охлаждения воды, замена всех форсунок. При реконструкции системы охлаждения валков с увеличением расхода воды одновременно следует увеличить и давление воды.

На рис. 4 показано расчетное влияние давления воды при постоянном расходе – 378 м³/ч на валок клетки № 6 и 320 м³/ч на валок клетки № 9 (а) и расхода воды при постоянном давлении 6,0 атм. (б) на температуру верхних рабочих валков клетей № 6 и 9.

Приведенные данные показывают высокую эффективность данных технических решений.

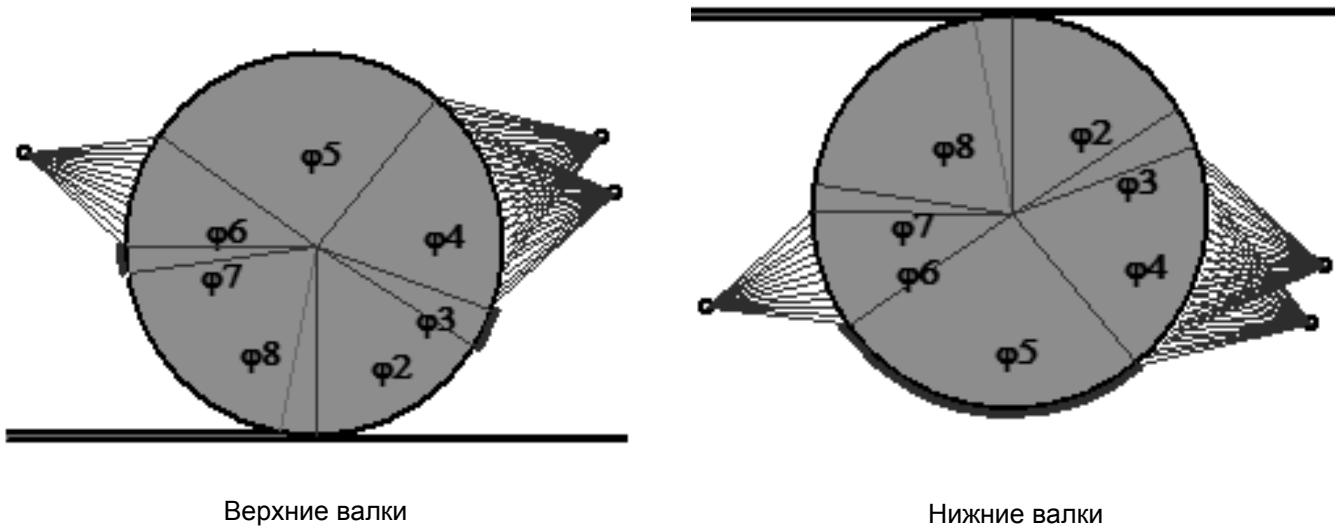


Рис. 3. Схемы охлаждения рабочих валков

Таблица 2

Результаты определения центральных углов зон охлаждения

Расположение вала	Угол	Значения углов (град.) по клетям					
		5	6	7	8	9	10
верх	φ ²	58	73	64	68	77	79
	φ ³	14	9	8	30	0	3
	φ ⁴	70	58	65	57	57	61
	φ ⁵	95	107	112	94	111	97
	φ ⁶	32	23	19	27	19	25
	φ ⁷	10	21	13	16	18	18
	φ ⁸	81	69	79	68	78	77
низ	φ ²	66	28	49	36	40	36
	φ ³	0	82	0	0	0	0
	φ ⁴	90	60	81	91	74	89
	φ ⁵	75	66	96	103	128	115
	φ ⁶	38	31	24	24	24	30
	φ ⁷	18	18	24	19	22	19
	φ ⁸	73	75	86	87	72	71

Вариант применения двухрядного коллектора со стороны входа был опробован в клетях № 6. При этом для сохранения общего расхода воды на клеть были заглушены крайние форсунки в коллекторе со стороны входа.

Схема подачи охладителя на валки показана на рис. 5.

Учитывая, что сортамент проката до и после установки двухрядного коллектора несколько отличался, а также повысилась температура воды от 21–23 до 25–27 °С, оценку эффективности охлаждения проводили по разнице температур верхнего и нижнего валков. При использовании однорядного коллектора со стороны входа температура верхнего вала превышала температуру нижнего на 6–10 °С (в среднем 8 °С). После установки двухрядного коллектора температура верхнего рабочего вала стала меньше, чем температура нижнего на 1–3 °С. То есть, уменьшение температуры верхнего рабочего вала составило

примерно 10 °С.

После получения положительных результатов эксперимента, двухрядные коллекторы были установлены на верхние валки клетей № 5 и нижние валки клетей № 5–7. В клетях № 7 двухрядный коллектор на верхний валок установить не удалось по конструктивным причинам.

Проведенные исследования показали снижение температуры рабочих валков клетей № 5–7 по сравнению с базовым периодом на величину от 0,5 до 17 °С. Среднее снижение температуры всех валков этих клетей составило 8 °С.

Вместе с тем, по сравнению с базовым периодом, изменились значения параметров охлаждения валков: температура воды снизилась в среднем на 3 °С; давление воды увеличилось на 1 бар. Изменился средний расход воды на охлаждение валков по клетям: в клетях № 5 – увеличился на 16 м³/ч, № 6 – увеличился на 95 м³/ч, в клетях № 7 – умень-

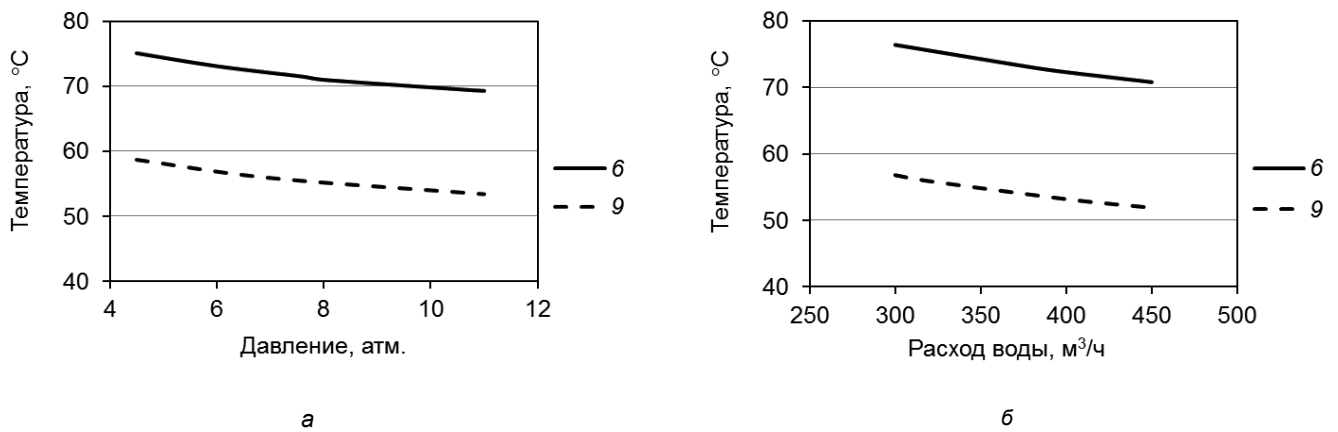


Рис. 4. Расчетное влияние давления воды при постоянном расходе (а) и расхода воды при постоянном давлении (б) на температуру верхних рабочих валков клеток № 6 и 9. Цифры у линий – номера клеток.

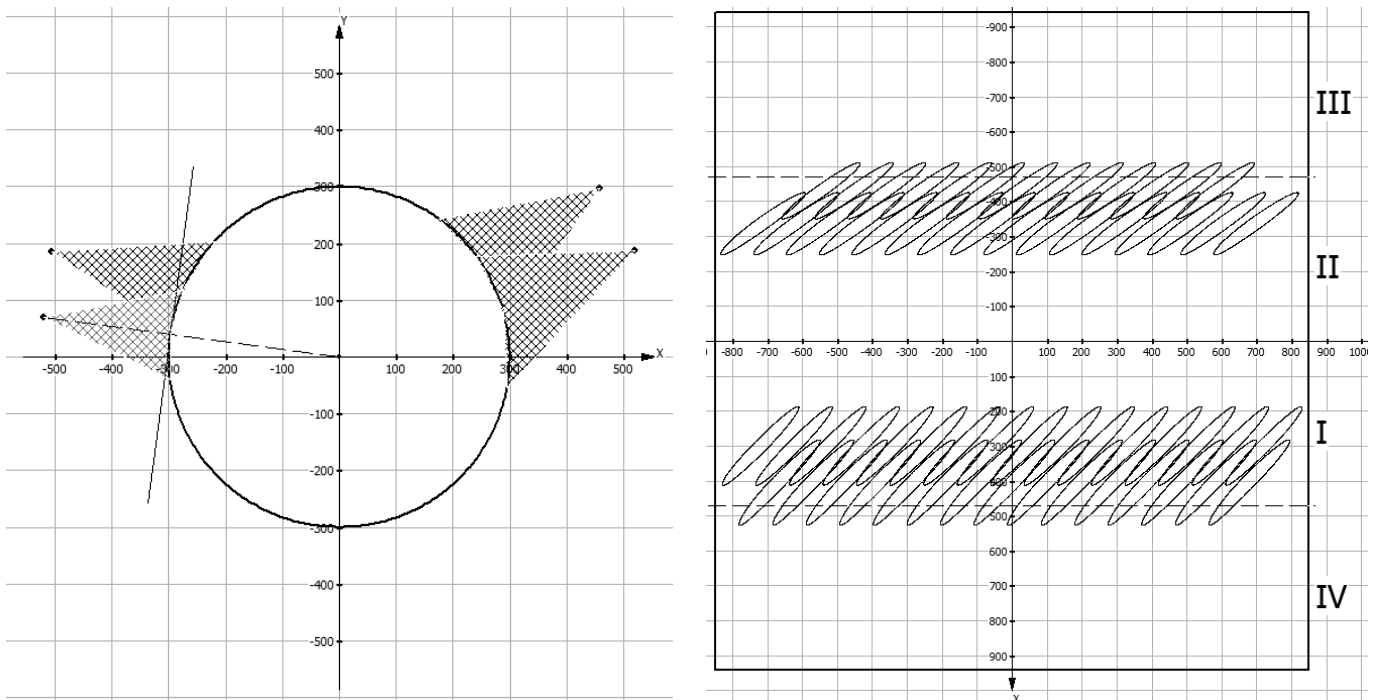


Рис. 5. Схема подачи охладителя на валки при установке двухрядного коллектора со стороны входа и проекции факелов на поверхности вала

шился на 64 м³/ч. В связи с этим были выполнены расчеты скорректированной температуры валков после модернизации системы охлаждения для исключения влияния указанных выше факторов. Изменение скорректированных температур валков по сравнению с базовыми составило от -18 до +8 °C. Среднее снижение температуры всех валков клеток № 5–7 составило 4 °C, что говорит о положительном влиянии модернизации системы охлаждения валков. Данные, полученные нами ранее для одной из клеток чистовой группы ШСГП (рис. 6), показывают, что такое снижение температуры валков приводит к уменьшению интенсивности их износа на 5–6 %.

Снижение температуры рабочих валков уменьшает износ валков и, следовательно, повышает эффективность их эксплуатации. Проведенное сравнение параметров эксплуатации высокохромистых чугуновых рабочих валков в клетях № 5–7 до и после модернизации СОВ (в течение одного квартала) показало,

что средняя удельная наработка увеличилась от 7686 до 8203 т/мм (6,7 %), а фактический удельный расход валков уменьшился от 0,231 до 0,118 кг/т.

Модернизация СОВ, очевидно, внесла определенный вклад и в повышение плоскостности полос. Так, за указанные сравнительные периоды интегральный уровень отсортировки горячекатаного металла по дефектам плоскостности уменьшился от 0,06 до 0,03 %.

Выводы

Определены фактические параметры системы охлаждения рабочих валков чистовой группы кле-

тей ШСГП 1680 ПАО «Металлургический комбинат «Запорожсталь», включая взаимное расположение коллекторов по отношению к поверхности валков, углы зон охлаждения по окружности валков, равномерность охлаждения по длине бочки валков, углы наклона плоскости факелов форсунок к оси коллек-

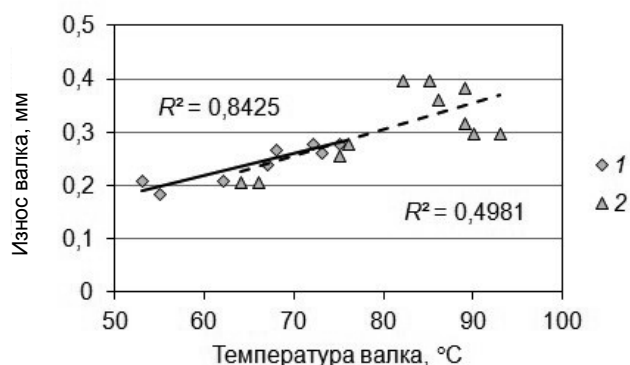


Рис. 6. Влияние температуры верхних (1) и нижних (2) валков на их износ

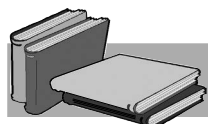
торов и углы раскрытия факелов форсунок. Проведен анализ эффективности системы охлаждения рабочих валков во взаимосвязи с параметрами прокатки полос и параметрами охлаждения.

На основе полученных результатов, с применением разработанных ранее компьютерных программ

расчета температуры валков, проанализированы различные варианты повышения эффективности СОВ. В качестве малозатратного решения предложено заменить однорядные коллекторы охлаждения валков со стороны входа клетей № 5–7 (как наиболее теплонагруженных) на двухрядные.

Экспериментально установлено среднее снижение температуры рабочих валков этих клетей на 0,5–17 °С. Путем расчетной коррекции температуры валков на изменившиеся параметры охлаждения (температуры, давления и распределения расхода охладителя по клетям) установлено, что среднее снижение температуры валков за счет реализованного варианта модернизации составило 4 °С.

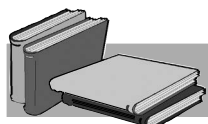
Эффективность модернизации подтверждена уменьшением фактического удельного расхода валков и увеличением средней удельной наработки валка.



ЛИТЕРАТУРА

1. Гарбер Э.А., Хлопотин М.В., Трайно А.И. и др. Моделирование теплового режима валков широкополосного стана горячей прокатки для определения эффективных режимов их охлаждения. *Металлы*. 2009. № 3. С. 34–47.
2. Prikhod'ko I.Yu., Vorobei S.A., Sergeenko A.A. et al. Temperature regulation of rollers in broad-strip hot-rolling mills. *Steel in Translation*. 2011. Vol. 40 (11). P. 985–989.
3. Платов С.И., Дема Р.Р., Лукьянов С.И. Разработка и внедрение технологии охлаждения прокатных валков с целью повышения их эксплуатационных характеристик на широкополосном стане 2000 ОАО «ММК». *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2012. № 2. С. 100–101.
4. Приходько И.Ю., Воробей С.А., Шатохин С.Е. и др. Методология научно-технического аудита системы охлаждения валков широкополосного стана горячей прокатки. *Труды шестого конгресса прокатчиков*. Том II. М., 2005. С. 97–104.
5. Приходько И.Ю., Воробей С.А., Шатохин С.Е. Моделирование процессов эффективного охлаждения валков листо-прокатных станов. *Сталь*. 2005. № 11. С. 72–77.
6. Воробей С.А., Приходько И.Ю. Моделирование температурного режима рабочих валков широкополосного стана горячей прокатки. *Научные новости. Современные проблемы металлургии. Пластическая деформация металлов*. Т. 8. Днепропетровск, 2005. С. 232–235.

Поступила 12.09.2019



REFERENCES

1. Garber, E.A., Khlopotin, M.V., Traino, A.I. et al. (2009). Modeling the thermal regime of rolls of a broadband hot rolling mill to determine their effective cooling regimes. *Metals*, no. 3, pp. 34–47 [in Russian].
2. Prikhodko, I.Yu., Vorobei, S.A., Sergeenko, A.A. et al. (2011). Temperature regulation of rollers in broad-strip hot-rolling mills. *Steel in Translation*. Vol. 40 (11), pp. 985–989 [in English].
3. Platov, S.I., Dema, R.R., Lukiyanov, S.I. (2012). Development and implementation of cooling technology for rolling rolls in order to increase their operational characteristics at the hot strip mill 2000 of OJSC MMK. *Bulletin of the Magnitogorsk State Technical University im. G.I. Nosova*, no. 2, pp. 100–101 [in Russian].
4. Prikhodko, I.Yu., Vorobei, S.A., Shatokhin, S.E. et al. (2005). Methodology of scientific and technical audit of the cooling roll system of a hot strip mill. *Proceedings of the sixth congress of distributors*. Vol. II. Moscow, pp. 97–104 [in Russian].
5. Prikhodko, I.Yu., Vorobei, S.A., Shatokhin, S.E. (2005). Modeling of processes of effective cooling of rolls of a hot strip mill. *Steel*, no. 11, pp. 72–77 [in Russian].

Анотація

І.Ю. Приходько¹, д-р техн. наук, ст. наук. співр., зав. відділу, e-mail: isi@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-5651-8106>;
С.О. Воробей¹, д-р техн. наук, ст. наук. співр., ст. наук. співр., e-mail: vso54@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0003-0119-3935>;
С.В. Мацко², начальник цеху гарячої прокатки тонкого листа, e-mail: sergey.matsko@zaporizhstal.com; **В.С. Панченко**², начальник відділу по гарячому прокату Дирекції з технології та якості Технічного управління, e-mail: v.st.panchenko@zaporizhstal.com

¹Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України (Дніпро, Україна)

²ПАТ «Металургійний комбінат «Запоріжсталь» (Запоріжжя, Україна)

Підвищення ефективності системи охолодження валків широкоштабового стану гарячої прокатки (ШСГП) 1680

Проведено обстеження системи охолодження робочих валків чистової групи клітей широкоштабового стану гарячої прокатки (ШСГП) 1680. Показано, що температура валків після прокатки штаб становить 40–80 °С. При цьому максимальні значення температури (65–80 °С) спостерігаються в перших трьох клітях чистової групи. Визначено розміри зон охолодження валків водою (19–38° для однорядних колекторів і 58–90° для дворядних) і їх розташування по колу валків всіх клітей чистової групи, а також відстані від форсунок до поверхні валків (200–350 мм при номінальній 200 мм). Встановлено особливості розподілу температур верхніх і нижніх валків по клітям чистової групи і по довжині бочки валків у взаємозв'язку з режимами прокатки штаб і умовами подачі охолоджувача на поверхню валків. Визначено, що збільшення погонної сили прокатки (на метр ширини штаби) від 5 до 15 МН/м підвищує температуру валків на 20–25 °С. Методами математичного моделювання оцінено можливість зниження температури валків за рахунок модернізації системи їх охолодження, зокрема: коригування кутів нахилу форсунок в колекторах – на 2 °С; заміна однорядних колекторів з боку входу в кліть на дворядні без зміни витрати води – на 4 °С; збільшення витрати води в одній кліті на 50 м³/год – на 2–4 °С; збільшення тиску води на 1 атм. – на 1–3 °С; застосування підстужування поверхні штаб перед входом в осередок деформації додатковим обсягом води – на 4 °С. Для маловитратного підвищення ефективності охолодження валків запропоновано в перших трьох клітях замінити однорядні колектори охолодження з боку входу в кліть на дворядні зі збереженням загальної витрати води за рахунок підбору типу форсунок. Експериментальне середнє зниження температури валків склало не менше 4 °С. Ефективність модернізації підтверджена зменшенням фактичної питомої витрати валків і збільшенням середнього питомого напруження валка.

Ключові слова

Температура робочих валків, параметри прокатки штаб, модернізація системи охолодження.

Summary

I.Yu. Prykhodko¹, Dr. Sci. (Engin.), Senior Research Scientist, Head of Department, e-mail: isi@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-5651-8106>; **S.A. Vorobei**¹, Dr. Sci. (Engin.), Senior Research Scientist, Senior Researcher, e-mail: vso54@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0003-0119-3935>; **S.V. Matsko**², Head of the Thin Sheet Hot Rolling Workshop, e-mail: sergey.matsko@zaporizhstal.com; **V.S. Panchenko**², Head of Hot Rolling Division, Directorate for Technology and Quality, Technical Department, e-mail: v.st.panchenko@zaporizhstal.com

¹*Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov of the NAS of Ukraine (Dnipro, Ukraine)*

²*PJSC Zaporizhstal Iron and Steel Works (Zaporizhzhia, Ukraine)*

Improving the efficiency of the roll cooling system of the Hot Strip Mill 1680

The cooling system for the working rolls of the finishing group of the stands of the Hot Strip Mill 1680 was examined. It is shown that the temperature of the rolls after rolling the strips is 40–80 °C. Moreover, the maximum temperature values (65–80 °C) are observed in the first three stands of the finishing group. The sizes of the cooling zones for the rolls with water (19–38° for singlerow collectors and 58–90° for two-row ones) and their location along the circumference of the rolls of all stands of the finishing group were determined, as well as the distance from the nozzles to the surface of the rolls (200–350 mm at a nominal 200 mm). The features of the temperature distribution of the upper and lower rolls along the stands of the finishing group and along the length of the roll barrel in relation to the strip rolling modes and the conditions for supplying the cooler to the surface of the rolls are established. It was determined that an increase in the rolling force (per meter of strip width) from 5 to 15 MN/m increases the temperature of the rolls by 20–25 °C. Using mathematical modeling methods, the possibility of reducing the temperature of the rolls due to the modernization of their cooling system was evaluated, in particular: adjusting the angle of the nozzles in the collectors – by 2 °C; replacement of single-row collectors from the entrance to the crate with double-row ones without changing the water flow rate – by 4 °C; increase in water consumption in one stand by 50 m³/h – by 2–4 °C; increase in water pressure by 1 atm. – by 1–3 °C; the use of undermining the surface of the strips before entering the deformation zone with an additional volume of water – by 4 °C. For a little costly increase in the efficiency of cooling the rolls, it was proposed to replace single-row cooling manifolds from the entrance to the stands by double-row in the first three stands, preserving the total water consumption by selecting the type of nozzles. The average decrease in the temperature of the rolls was at least 4 °C. The effectiveness of modernization is confirmed by a decrease in the actual specific consumption of rolls and an increase in the average specific operating time of the roll.

Keywords

Temperature of working rolls, strip rolling parameters, cooling system modernization.

Е.В. Парусов, канд. техн. наук, ст. наук. співр., зав. відділу, e-mail: tometal@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-4560-2043>

Г.В. Левченко, д-р техн. наук, проф., зав. лабораторією, e-mail: isi@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0003-1173-5320>

В.А. Луценко, д-р техн. наук, пров. наук. співр., e-mail: lutsenkovlad2@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4604-5592>

С.В. Бобирь, д-р техн. наук, пров. наук. співр., e-mail: svboby07@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6816-1554>

О.В. Парусов, канд. техн. наук, ст. наук. співр., e-mail: tometal@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-9879-6179>

І.М. Чуйко, канд. техн. наук, ст. наук. співр., e-mail: ferrosplav@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-4753-614X>

Т.М. Голубенко, канд. техн. наук, ст. наук. співр., e-mail: sumer@i.ua, <https://orcid.org/0000-0002-3583-211X>

Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України (Дніпро, Україна)

Наукові і технологічні основи виробництва високоефективних видів сортового та бунтового прокату

Відображено історію заснування, розвитку й головні наукові напрямки діяльності відділу термічної обробки металу для машинобудування Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України. Показано, що фахівцями відділу зроблено значний внесок у розробку наукових основ створення технологічних процесів виготовлення високоякісного металопродукту широкого марочного складу та різноманітного призначення. Результати фундаментальних досліджень використовуються при розробці та вдосконаленні технологій виробництва сортового й бунтового прокату, який характеризується високими споживчими властивостями, масштабністю та результативністю. Наукові розробки, які базуються на подальшому розвитку уявлень про сучасне матеріалознавство, знайшли свою практичну реалізацію на багатьох металургійних, метизних та машинобудівних підприємствах. Промислово впроваджені інноваційні режими деформаційно-термічної та термічної обробки сталей як з прокатного, так і окремого нагрівів, у тому числі із застосуванням криогенної обробки, обумовили можливість підвищення їх класу міцності, довговічності, зносо- та термостійкості в процесі експлуатації. Розроблено методики ультразвукового контролю та диференційного магнітного аналізу легованих сталей; запропоновано авторські методики розрахунку фазового складу та температур фазово-структурних перетворень у легованих і вуглецевих сталях; створено комп'ютерні програмні оболонки для побудови ізотермічних та термодинамічних діаграм розпаду метастабільного аустеніту, моделювання умов реального виробничого процесу з достовірним прогнозуванням структури й механічних властивостей прокату різноманітного призначення в залежності від хімічного складу сталі та параметрів технологічного процесу. Впроваджені технологічні рішення відповідають рівню кращих світових аналогів, а результати фундаментальних досліджень зробили вагомий внесок у підвищення енерго- та ресурсозбереження металургійної, метизної та машинобудівної галузей промисловості України.

Ключові слова: бунтовий прокат, сортовий прокат, деформаційно-термічна обробка, енергозбереження, фазові перетворення, структурні перетворення, механічні властивості, канати, дріт, металокард, валки, прошивні оправки, холодне об'ємне штампування.

Актуальність та стан об'єкту дослідження. Сучасні машинобудівні та метизні підприємства пред'являють все більш жорсткі вимоги до якісних і експлуатаційних властивостей готових металовиробів, що нерозривно пов'язано з якістю вихідної сировини – сортового й бунтового прокату. Застосування нових підходів до режимів деформаційно-термічної або термічної обробки дозволяє істотно впливати на механічні властивості сталей за рахунок цілеспрямованого впливу на процеси структуроутворення. Формування механічних і експлуатаційних властивостей визначається структурою сталі, яка залежить від хімічного складу, параметрів режиму гарячої пластичної деформації, температури та швидкості охолодження. Відділ термічної обробки металу для машинобудування Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України працює про-

тягом 23 років і є послідовником ідей наукових шкіл академіка Стародубова К.Ф., академіка Тарана-Жовніра Ю.М. та чл.-кор. Буніна К.П. У 1975 році в Інституті чорної металургії було засновано лабораторію термічної обробки сортового прокату й катанки, яку очолив кандидат технічних наук Поляков С.М. У 1996 році на базі цієї лабораторії під керівництвом доктора технічних наук Парусова В.В. було створено відділ термічної обробки металу для машинобудування. З 2015 року відділ очолює кандидат технічних наук, старший науковий співробітник Парусов Е.В. У 2017 році до складу відділу увійшла лабораторія проблем структуроутворення і властивостей чорних металів під керівництвом доктора технічних наук, професора Левченка Г.В. Фахівцями відділу зроблено значний внесок у розробку наукових основ створення технологічних процесів виготовлення високоякісного

металопрокату широкого марочного складу й різноманітного призначення. Результати фундаментальних досліджень відділу постійно використовуються при розробці та вдосконаленні технологічних процесів виготовлення металопродукції, яка характеризується підвищеними споживчими властивостями, масштабістю та результативністю. Наукові розробки відділу, які базуються на розвитку подальших уявлень про сучасне матеріалознавство, знайшли свою практичну реалізацію на багатьох металургійних, метизних та машинобудівних підприємствах України та ближнього зарубіжжя. З урахуванням світових тенденцій розробляються нові вимоги та рекомендації для створення сучасних нормативних документів (державні стандарти, технічні умови, технічні угоди) на високоякісні види прокату відповідального призначення. Розроблено та промислово впроваджено принципово нові режими деформаційно-термічної та термічної обробки сталей і сплавів як із прокатного, так і окремого нагрівів, у тому числі із застосуванням криогенної обробки, захищені патентами на винахід. Розроблено методики ультразвукового дослідження кількості залишкового аустеніту в легованих сталях та диференційного магнітного аналізу надмалої кількості надлишкових фаз у сталях аустенітного класу; запропоновано авторські методики розрахунку фазового складу та температур фазово-структурних перетворень у легованих і вуглецевих сталях; створено комп'ютерні програмні оболонки для побудови ізотермічних і термокінетичних діаграм розпаду метастабільного аустеніту, моделювання реальних виробничих процесів із протіканням фазових і структурних перетворень, а також прогнозування механічних властивостей та інших якісних показників прокату різноманітного призначення в залежності від хімічного складу сталі й параметрів технологічного процесу. Підписана угода про асоціацію між Україною та Європейським Союзом створює основу для проведення подальших досліджень, які направлені на освоєння нових марок сталей, якісні показники яких повинні відповідати вимогам європейських стандартів, а також впровадження технологічних схем виробництва з урахуванням подальшого підвищення якості прокату при зменшенні загальних матеріальних витрат на його виробництво.

Мета роботи – аналіз та систематизація інформації про головні наукові напрямки досліджень та промислове впровадження розробок відділу термічної обробки металу для машинобудування Інституту чорної металургії ім. 3.І. Некрасова НАН України.

Матеріал та методика досліджень. Під час отримання представлених результатів використано низько-, середньо-, високовуглецеві й леговані сталі, а також наступне лабораторне обладнання: муфельні нагрівальні печі; реверсивний прокатний стан «ДУО 280»; розривні машини «EUS-100», «TTDM-5004 Instron», «Amsler»; оптичні світлові мікроскопи «Neophot-2», «Neophot-32», «Axiovert 200M MAT», растровий електронний мікроскоп «VEGA TS5130MM» з енергодисперсійним спектрометром «INCA ENERGY-300», трансмісійні електронні мікро-

скопи «УЕМВ-100К» і «JEOL JEM-100 CX»; високоточні аналітичні ваги «ВЛА-200г-М»; маятникові копри «ПСВ-5», «ПСВ-30», машини «К-5» та «МГ-1» для випробувань на скручування та перегин; прилади для визначення твердості «ТК-М», «ТБ 5004», «ТП-7Р-1», «ТКС-1»; мікротвердоміри «ПМТ-3» і «МНТ-240»; «Метасекар» для підготовки зразків до металографічного аналізу.

Результати досліджень та їх обговорення.

1. Бунтовий прокат для металокарду і пружин [1–3]. Розроблено й успішно впроваджено ресурсозберігаючу технологію виробництва бунтового прокату діаметром 5,5 мм із високовуглецевої сталі 80КРД і 90К, яка призначена для виготовлення армуючого матеріалу для автомобільних шин – металокарду. При переробці бунтового прокату зі сталі 80КРД і 90К у високоміцний і надвисокоміцний металокард вдалося виключити як вихідне патентування прокату, так і проміжне на переробній заготовці діаметром 3,2 мм. На відміну від традиційної (застарілої) схеми переробки бунтового прокату кордового призначення патентування проводиться тільки на діаметрі 1,8 мм. Видалення поверхневої окалини здійснюється як механічним, так і хімічним способами. Глибина знеуглецьованого шару на поверхні прокату не перевищує в середньому 1,0 %, ефективна мікроструктура (кількість сорбітоподібного перліту за еталонними шкалами ГОСТ 8233-56 становить понад 75 %), розмір неметалевих включень (які деформуються – не більше 17 мкм, які не деформуються – не більше 12 мкм) дозволяє проводити безобривне волочіння бунтового прокату з сумарним ступенем холодної пластичної деформації не менше 95 %. При розробці технології виробництва бунтового прокату з високовуглецевої сталі 80КРД і 90К було встановлено особливості кінетики перетворення аустеніту при безперервному охолодженні, побудовано термокінетичні, ізотермічні та структурні діаграми; встановлено співвідношення між дисперсністю перліту та тимчасовим опором розриву, масою окалини й знеуглецьованим шаром; розроблено критеріальну оцінку деформованості прокату в дріт, яка враховує сумарну площу неметалевих включень у поперечному перерізі прокату дроту; встановлено вплив на міжпластинкову відстань у перліті температури початку й швидкості повітряного охолодження; визначено раціональні співвідношення вмісту бору до азоту для бунтового прокату з вуглецевих сталей, що ефективно впливає на зменшення деформаційного старіння й підвищення технологічної пластичності металу на метизному переробі. Розроблено науково-обґрунтовані режими виробництва бунтового прокату зі сталей 70 і 55 діаметром 6,5 і 5,5 мм, які призначені для виготовлення високоміцного пружинного дроту. Упроваджено наскрізні енергозберігаючі технології виробництва пружинного дроту діаметрами 3,70; 2,20; 1,75 і 1,40 мм. Розроблені режими деформаційно-термічної обробки прокату дозволили забезпечити його пряме волочіння (без застосування патентування) з попереднім видаленням поверхневої окалини механічним способом. Виготовлена металопродукція під час

приймально-здавальних випробувань показала повну відповідність вимогам європейських і національних стандартів та технічних умов.

2. Бунтовий прокат для високоміцних арматурних канатів (пасм) [4]. Одним із найбільш ефективних армуючих матеріалів на сучасному будівництві є арматурні канати (пасма), які використовуються як самостійно (вантові мости), так і в залізобетонних конструкціях (будівлі, віадуки, резервуари, ангари, нафтовидобувні платформи, атомні електростанції, аеропорти, тунелі тощо). Для виготовлення арматурних пасм використовується бунтовий прокат діаметром від 5,0 до 14,0 мм із вмістом вуглецю 0,70–0,90 %. При виробництві арматурних пасм класів міцності 1770, 1860 2060 МПа за EN 10138-3:2009 вихідна міцність прокату повинна бути не менша, ніж 1150, 1200 і 1250 МПа відповідно. Арматурні пасма отримують шляхом звивання дроту в 3-, 7- або 19-дротові канати з подальшою їх стабілізацією (короткочасний відпал при температурах 370–390 °С з протинатягненням із залишковою деформацією до 1,1 %). Стабілізовані арматурні канати мають ряд переваг перед канатами, виготовленими без стабілізуючої обробки, так як характеризуються збільшенням границі текучості й тимчасового опору розриву на 10–15 %; збільшенням границі пружності на 25–30 %; зниженням втрат напружень при релаксації на 5–8 %; підвищенням надійності та довговічності експлуатації різноманітних конструкцій. Європейські виробники виготовляють високоміцний дріт для арматурних канатів з високовуглецевих сталей C80D2...C88D2 (за EN ISO 16120-4:2011). Після завершення гарячої деформації бунтовий прокат піддається прискореному охолодженню на сучасних лініях типу Стелмор, що дозволяє виготовляти з такої сировини за схемою прямого волочіння (без попереднього та/або проміжного патентування) високоміцний дріт для подальшого звивання у високоміцні арматурні канати. Співробітниками відділу проведено роботи зі встановлення закономірностей впливу хімічного складу й режимів деформаційно-термічної обробки прокату з високовуглецевої сталі, легованої хромом та/або ванадієм і бором, на процеси структуроутворення, механічні властивості й технологічність переробки у високоміцний дріт, який призначений для виготовлення арматурних канатів. Із урахуванням встановлених закономірностей структуроутворення розроблено та промислово впроваджено інноваційну технологію виробництва бунтового прокату зі сталі C86D діаметром 8,0–11,0 мм, яка забезпечує ефективне поєднання структури, механічних та технологічних властивостей, дозволяє підвищити сумарний ступінь холодної пластичної деформації й отримувати високоміцний дріт діаметром 3,0–5,0 мм із використанням схеми прямого волочіння. На метизних підприємствах було виготовлено стабілізовані високоміцні арматурні канати діаметром 9,3; 12,5 та 15,2 мм із бунтового прокату діаметром 8,0; 10,0 та 11,0 відповідно. Виготовлені високоміцні арматурні канати під час приймально-здавальних випробувань показали повну відповідність вимогам EN 10138-3:2009.

3. Бунтовий прокат для виготовлення зварювального дроту [5]. Розроблено й успішно впроваджено технологію виробництва й переробки високоякісного бунтового прокату діаметром 5,5–6,5 мм підвищеної деформованості зі сталей Св-08Г2С, Св-08ГА, Св-10ГА, Св-10НМА, Св-08ХМ, Св-08ГМ, Св-10ГМ, Св-08ГНМ, Св-08Г1НМА, Св-08ХГ2СМФ, Св-10ХГ2СМФ, Св-08Г1НФАА, Св-08Г1Н2ФАА, S2Mo, SG1, SG2, SG3, які призначені для виготовлення зварювального обмідненого дроту діаметром 0,8–5,0 мм для напів- і автоматичного зварювання відповідальних конструкцій у середовищі захисних газів і під флюсом (ємностей для рідин і газів, магистральних газо- і нафтопроводів, конструкцій залізничних вагонів і важкого автотранспорту, мостів тощо). Традиційна технологія виготовлення зварювального дроту включає хімічне видалення окалини, волочіння бунтового прокату діаметром 5,5–6,5 мм в дріт діаметром 0,8–5,0 мм із застосуванням однієї або двох операцій пом'якшувальної термічної обробки (рекристалізаційного відпалу). Зазначена технологія виготовлення зварювального дроту з легованих сталей є досить енерговитратною: характеризується значною тривалістю технологічного циклу, вимагає використання більшої кількості енергоресурсів, технологічного обладнання й виробничих площ, підвищеної чисельності обслуговуючого персоналу та негативно впливає на навколишнє середовище. Співробітниками відділу розроблено принципи пластифікації бунтового прокату зварювального призначення, які знижують дію структурно-деформаційних зміцнюючих ефектів і полягають у наступному: зменшенні загального ступеня легування твердого розчину за рахунок зниження (в границях інтервалів вимог нормативної документації) вмісту в сталі вуглецю, марганцю, кремнію, фосфору, хрому, нікелю, міді, молібдену, ванадію; зниженні мікродеформації кристалічної решітки фериту й щільності дислокацій за рахунок зменшення в твердому розчині атомів впровадження – азоту, що досягається завдяки мікролегуванню сталі бором, з метою утворення дрібнодисперсних частинок нітриду бору при співвідношенні вмісту бору до азоту, близькому до стехіометричного у сполуці BN; зменшенні ліквідаційних явищ в безперервнолитих заготовках і прокаті; зменшенні кількості структурних концентраторів напружень (бейніто-мартенситні структури) шляхом проведення знеміцнюючої деформаційно-термічної обробки прокату на лінії типу «довгий» Стелмор. Важливим аспектом також є отримання бунтового прокату з поверхневою окалиною, яка повинна легко видалятися механічним способом. При цьому на поверхні прокату має бути мінімальна кількість залишкової окалини, що необхідно для стабільності технологічного процесу волочіння та якісного нанесення мідного покриття на поверхню дроту. Розроблена й промислово впроваджена технологія виробництва бунтового прокату підвищеної деформованості дозволяє виготовляти обміднений зварювальний дріт необхідних діаметрів із використанням механічного видалення поверхневої окалини та без застосування додаткової термічної обробки

(відпалу). Виготовлений зварювальний дріт під час прийнятно-здавальних випробувань показав повну відповідність вимогам ГОСТ 2246-70.

4. Прокат для холодного об'ємного штампування (ХОШ) [6]. В Україні та країнах ближнього зарубіжжя прокат, призначений для ХОШ, виготовляють відповідно до вимог ГОСТ 10702-2016 і ДСТУ 3684-98, дотримання яких забезпечує виготовлення якісних кріпильних виробів із гарячекатаного прокату шляхом холодної деформації зі ступенем не менше ніж 75 %. При поставці сировини для виготовлення кріпильних виробів методом ХОШ для закордонних споживачів у ряді випадків критерії оцінки якості прокату відрізняються від вимог національних стандартів, що обумовило необхідність розробки нових і вдосконалення існуючих марок економнолегованих сталей і режимів їх обробки. Розроблено новий підхід до мікролегування сталей бором, згідно з яким, необхідна прогартуваність досягається при вмісті бору, що перевищує на 0,003 % за масовою часткою вміст азоту. У загальному вигляді співвідношення вмісту бору й азоту визначається за наступною формулою: $B \div N = (1 + K \div N)$, де K – коефіцієнт, який дорівнює 0,0025–0,0035 %. На підставі проведених досліджень створено сталь із розширеними границями вмісту бору (0,005–0,015 %), у порівнянні з раніше використовуваними (0,001–0,005 %), що дозволяє підвищити прогартуваність сталі при вмісті азоту за масовою часткою до 0,012 %. За допомогою методу багатокритеріальної оптимізації встановлено: 1) показники міцності та пластичності прокату з борвмісних сталей, підданого знеміцнюючій деформаційно-термічній обробці, при спільному збільшенні вмісту азоту і бору зростають; 2) при вмісті азоту до 0,0074 % підвищення вмісту бору приводить до зниження міцності та підвищення пластичності прокату; 3) твердість серцевини загартованого в маслі прокату з борвмісних сталей, що характеризує прогартуваність, досягає максимальних значень при вмісті азоту і бору 0,0062–0,0080 % та 0,0062–0,010 % відповідно. Нижні границі вмісту азоту і бору характерні для сталей, у яких поряд з бором містяться алюміній і титан, а верхні границі – для борвмісних сталей нового покоління. Показано, що холодна пластична деформація борвмісних сталей для ХОШ зі структурою фериту й пластинчастого перліту зумовлена зниженням міцності й підвищенням пластичності за умови виконання встановленого співвідношення між вмістом бору та азоту в сталі. На підставі теоретичних і експериментальних досліджень розроблено й промислово впроваджено наскрізну технологію виробництва прокату з економнолегованої електросталі з підвищеним вмістом бору та азоту, розлитої в заготовки перерізом 125×125 мм на машинах безперервного лиття. Розроблено та погоджено зі споживачами нормативну документацію на прокат із борвмісних сталей 12Г1Р, 20Г2Р, 30Г1Р, в яку внесено встановлені вимоги до якісних показників. У технологічні інструкції заводів-виробників внесено параметри знеміцнюючої деформаційно-термічної обробки прокату для ХОШ із борвмісних сталей, що забезпечує протікання процесів

статичної рекристалізації аустеніту та формування в структурі прокату співвідношення фериту до перліту, близького до рівноважного ($\Phi \div P = 65 \div 35$). Виготовлений прокат, який призначений для ХОШ, під час прийнятно-здавальних випробувань показав повну відповідність вимогам ГОСТ 10702-2016, ДСТУ 3684-98 і вимогам зарубіжних споживачів.

5. Крупнорозсортовний прокат із легованих сталей для автомобіле- і машинобудування [7]. Створено наукові основи для енергозберігаючих технологій виробництва прокату на обтисочнозаготовчих і крупнорозсортовних станах металургійних підприємств України. Досліджено технологічні процеси гарячої обробки тиском, протифлокеної й термічної обробки крупнорозсортовного прокату з легованих сталей. Проаналізовано розрахункові методи визначення параметрів прокатки на обтисочно-заготовчому стані й розроблено комп'ютерний спосіб розрахунку параметрів зусиль і навантажень у основних вузлах головної лінії стану. Досягнуто мінімально допустиме зниження часу ізотермічної витримки при термічній обробці із забезпеченням необхідних якісних показників прокату та встановлені особливості структуроутворення при охолодженні сортового крупнорозсортовного прокату зі сталі 42Cr4Mo2, що дозволило при комбінованій термічній обробці скоротити тривалість ізотермічної витримки на 38 % й заощадити витрати природного газу й електроенергії. Встановлено, що збільшення вмісту хрому й молібдену на 0,09 % звужує температурний інтервал перлітного перетворення та підвищує стійкість аустеніту, а збільшення швидкості охолодження у 1,6 рази приводить до збільшення частки бейнітної складової та зменшення кількості перліту. Встановлено вплив температурно-часових параметрів пом'якшувальної термічної обробки на структуроутворення й твердість прокату з хромомолібденової сталі. Суттєве зменшення значень твердості досягається завдяки зміні морфології карбідів у бейніті й перліті. При цьому мікротвердість відпущеного бейніту має менші значення, ніж сфероїдизовані перлітні ділянки, тому в початковому, охолодженому з підвищеною швидкістю прокаті поява більшої частки метастабільних (бейнітних) структур і зменшення частки перліту обумовлює при відпалі загальне зменшення твердості хромомолібденової сталі. Розроблено науково-обґрунтований режим комбінованої термічної обробки прокату з безперервнолитої конструкційної легованої сталі, що включає прискорене охолодження після гарячої деформації, нагрівання до 660–700 °С з ізотермічною витримкою 4 години, охолодження з пічкою до 300 °С, далі – на повітрі. Запропоновано режим комбінованої термічної обробки, який направлено на отримання необхідних якісних показників легованого прокату з одночасним зменшенням енерговитрат на його виробництво. Встановлено особливості формування структури та зміни твердості прокату діаметром 100–140 мм з хромомолібденової й хромомолібденованадієвої (42CrMo4 та 31CrMoV9) сталі після нагрівання до різних температур аустенітизації та подальшого охолодження з різними швидкостями. Досліджено особливості впливу хімічного

складу на механічні властивості сталі та побудовано залежності, які дозволяють виявити вплив зміни вмісту хімічних елементів (хрому, молібдену й ванадію) на механічні властивості легованого сортового прокату через показник структурного стану. Встановлено, що для сталі 31CrMoV9 характерна наявність інтервалу аномального росту аустенітного зерна при температурі 950 °C, а підвищення температури аустенізації призводить до укрупнення зерені, що забезпечує уповільнення розпаду й підвищення стійкості переохолодженого аустеніту. Зміна температури завершення безперервного охолодження до 400–450 °C замість 200 °C скорочує час нагріву на 6 годин і знижує ймовірність викривлення прокату. Розроблено науково-обґрунтовані режими термічної обробки, які забезпечують отримання необхідних властивостей гарячедеформованого прокату зі зниженням енерговитрат при проведенні відпалу хромомолібденової та хромомолібденованадієвої сталей. Запропонований режим термічної обробки сталей 42CrMo4 та 31CrMoV9 дозволяє гарантовано досягти вимог європейської нормативної документації, зокрема EN 10083:2006 та EN 10085:2001 відповідно.

6. Арматурний прокат для анкерного кріплення гірничих виробок та для армування залізобетонних конструкцій [8]. Визначено раціональний хімічний склад сталей і технологічні параметри виробництва гарячедеформованого арматурного прокату з гвинтовим профілем для анкерного кріплення гірничих виробок високої і особливо високої несучої здатності. Для безперервнолитих сталей із вмістом вуглецю 0,20–0,50 % встановлено, що хімічний склад аустеніту сталі не є домінуючою причиною утворення фериту або перліту під час його розпаду. Підвищення механічних властивостей доєвтектоїдних сталей після нормалізації пов'язане з утворенням в ліквіційних ділянках дендритної структури фериту, збагаченого домішковими елементами. Розвинено методи прогнозування механічних властивостей арматурного прокату після холодної пластичної деформації та способи підвищення показників пластичності холоднодеформованого арматурного прокату. Розроблено та введено в дію відповідну нормативну документацію на бунтовий прокат підвищеної міцності для виробництва холоднодеформованого арматурного прокату періодичного профілю класу B500 для армування залізобетонних конструкцій.

7. Інструмент для гарячого деформування металу [9–11]. Вдосконалено хімічний склад низьковуглецевих економнолегованих сталей для виготовлення інструменту гарячої деформації. В процесі проведення досліджень встановлено, що застосування сталей 20ХФ та 15ХСТ для виготовлення штампів гарячого деформування в умовах інтенсивного охолодження сприяє підвищенню їх експлуатаційної стійкості та є економічно доцільним. У результаті проведених заходів (вакуумування сталі, модифікування силікокальцієм і мікролегування титаном) зазначені сталі набули більш високих механічних властивостей і підвищеної експлуатаційної стійкості у порівнянні з традиційними сталями 30 та 20ХФ. Для виготовлення

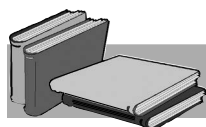
оправок пресу 10000 т запропоновано сталь 12Х5МА, яка має найбільшу експлуатаційну стійкість в умовах термоцикування з інтенсивним охолодженням водою й помірних силових навантажень. Для виготовлення деталей пресуансону пресу 2000 т запропоновано сталь 17Х5МА, яка є більш жароміцною. Розроблено енергоефективний режим термічної обробки деталей зі сталі 17Х5МА, що дозволило підвищити стійкість інструменту гарячого деформування металу в 3–4 рази, скоротити тривалість термічної обробки на 50 % та зменшити витрати енергоносіїв: природного газу на 220 м³ і електроенергії на 221 кВт на одну обробку. Встановлено, що сталь 25Х2М1Ф має більш високу міцність при підвищеній температурі, ніж сталь 20ХН4ФА, а тому є більш ефективним матеріалом для виготовлення прошивних оправок трубопрокатного стану. Твердість і стійкість оправок зі сталі 25Х2М1Ф в цілому вищі, ніж для сталі 20ХН4ФА, що пов'язано з легуванням молібденом і більш високим вмістом хрому. Використання сталі 25Х2М1Ф й розробленого режиму термічної обробки забезпечило підвищення експлуатаційної стійкості оправок у 2,5 рази. Побудовано ізотермічні, термокінетичні й структурні діаграми сталей 50ХГМ та 45Х3ГНМФ, які призначені для виготовлення валків, встановлено особливості формування механічних властивостей у залежності від швидкостей охолодження до наднизьких температур (криогенна обробка). Розрахунковим методом встановлено розподіл термічних напружень у робочому валку вагою 85 т зі сталі 50ХГМ, оцінено рівень напружень, які виникають при фазових перетвореннях, а також рівень залишкових внутрішніх напружень. Розроблено рекомендації щодо вдосконалення параметрів режиму термічної обробки сталей, які призначені для виготовлення прокатних валків. Таким чином, науково-технологічні досягнення відділу термічної обробки металу для машинобудування відповідають рівню кращих світових аналогів. Результати фундаментальних досліджень зробили вагомий внесок у енерго- та ресурсозбереження металургійної, метизної та машинобудівної галузей промисловості України, що підтверджено значним економічним ефектом від упровадження розробок на промислових підприємствах. Отримані в результаті тісної співпраці співробітників відділу з працівниками технічних служб металургійних, метизних, машинобудівних підприємств нові види металопродукції дозволяють національним виробникам гідно представляти свою продукцію на міжнародних ринках збуту та успішно конкурувати з визнаними світовими лідерами у відповідній галузі промисловості.

Висновки

Представлено дослідницьку стратегію відділу термічної обробки металу для машинобудування, яка полягає у вирішенні сучасних проблем матеріалознавства, встановленні нових та подальшому розвитку існуючих фундаментальних положень, що дозволяє цілеспрямовано впливати на формування структури та механічних властивостей залізобетонних

металів і сплавів. Результати фундаментальних досліджень дозволили промислово впровадити ресурсо- та енергозберігаючі технології виробництва сортового й бунтового прокату з вуглецевих та легированих сталей, призначених для промислового й цивільного будівництва, газо- та нафтопроводів, машинобудування й транспортної галузі. Основні напрямки діяльності пов'язані з дослідженням особливостей фазових та структурних перетворень під час деформаційно-термічної обробки вуглецевих і легированих сталей різноманітного призначення в потік сучасних прокатних станів. Дослідження відділу термічної обробки металу для машинобудування спрямовані на зменшення безповоротних втрат прокату, підвищення зносо- та термостійкості металів і сплавів, моделювання нерівноважних фазових пе-

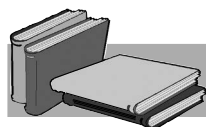
ретворень, контрольоване управління процесами структуроутворення, що дозволяє раціонально поєднувати механічні властивості сталей з експлуатаційними показниками готових металовиробів без застосування додаткових термічних обробок. Наукова цінність представлених розробок полягає у тому, що результати досліджень мають як фундаментальний, так і прикладний характер, що зумовлено постійним нерозривним зв'язком отриманих результатів із металургійною практикою. Це позитивно впливає не тільки на розвиток конкретної галузі промисловості, а й забезпечує подальше зростання реального сектору економіки України за рахунок отримання високотехнологічної металопродукції, на яку є попит з боку світових споживачів.



ЛИТЕРАТУРА

1. Парусов В.В., Сычков А.Б., Парусов Э.В. Теоретические и технологические основы производства высокоэффективных видов катанки. Днепропетровск: Арт-пресс, 2012. 376 с.
2. Lutsenko V.A., Peretyagina E.A., Vengura A.V., Bobkov P.A., Savinkov V.V. Energy-saving sorbitization of high-carbon wire rod in the 150 mill. *Steel in Translation*. 2013. Vol. 43. Iss. 5. P. 321–324.
3. Парусов Э.В., Парусов В.В., Парусов О.В., Сычков А.Б., Пришляк Р.Р., Сагура Л.В., Сивак А.И. Влияние качественных характеристик высокоуглеродистой катанки на свойства пружинной проволоки. *Строительство, материаловедение, машиностроение. Сб. науч. тр.* Днепропетровск: ПГАСА, 2009. Вып. 48. ч. 1. С. 34–38.
4. Parusov E.V., Parusov V.V., Sagura L.V., Derevyanchenko I.V., Dolgiy S.V., Gremechev S.A., Demyanova L.I. Development of energy- and resource-saving production technology of highstrength strands. *Metallurgical and Mining Industry*. 2016. № 5. P. 100–104.
5. Сычков А.Б., Парусов В.В., Нестеренко А.М. и др. Структура и свойства катанки для изготовления электродов и сварочной проволоки. Бендеры: Полиграфист, 2009. 608 с.
6. Парусов В.В., Парусов О.В., Сычков А.Б. Прокат из борсодержащих сталей для высокопрочных крепежных изделий. Днепропетровск: Арт-пресс, 2010. 160 с.
7. Lutsenko V.A., Anelkin N.I., Golubenko T.N., Shcherbakov V.I., Lutsenko O.V. Morphology modification of carbon chromium-molybdenum steel structure influenced by heat treatment. *CIS Iron and Steel Review*. 2012. № 1. P. 38–40.
8. Левченко Г.В., Оробцев А.Ю., Хорошилов В.В. Освоение производства проката с винтовым профилем класса прочности А600 для анкерного крепления горных выработок. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2014. № 3. С. 49–52.
9. Бобырь С.В., Демина Е.Г., Беседнов С.В., Стрижко О.Д. Влияние химического состава, твердости и типа поверхностных дефектов на стойкость штампов пресса 10 000 тонн из низколегированных сталей. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2014. № 1. С. 65–69.
10. Бобырь С.В., Нефедьева Е.Е., Лошкарев Д.В. Моделирование и оптимизация процесса отпуска стали 17Х5МА для инструмента горячей деформации. *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: Сб. науч. тр.*, 2015. Вып. 30. С. 324–331.
11. Бобырь С.В., Демина Е.Г., Липатов И.Ю. Влияние термической обработки на структуру и свойства низколегированных штамповых сталей. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2012. № 4. С. 69–73.

Поступила 13.09.2019



REFERENCES

1. Parusov V.V., Sychkov, A.B., Parusov, E.V. (2012). Theoretical and technological bases of production of high species wire rod. Dnepropetrovsk: Art-press, 376 p. [in Russian].
2. Lutsenko V.A., Peretyagina, E.A., Vengura, A.V., Bobkov, P.A., Savinkov, V.V. (2013). Energy-saving sorbitization of high-carbon wire rod in the 150 mill. *Steel in Translation*. Vol. 43. Iss. 5, pp. 321–324 [in English].
3. Parusov E.V., Parusov, V.V., Parusov, O.V., Sychkov, A.B., Prishlyak, R.R., Sagura, L.V., Sivak, A.I. (2009). Effect of qualitative characteristics of high-carbon rolled wire on properties of springing wire. *Stroitel'stvo, materialovedenie, mashinostroenie. Sb. nauch. tr. Construction, material science, engineering. Collection of scientific works*. Dnepropetrovsk: PGASA. Iss. 48. Part 1, pp. 34–38 [in Russian].
4. Parusov E.V., Parusov V.V., Sagura L.V., Derevyanchenko I.V., Dolgiy S.V., Gremechev S.A., Demyanova L.I. (2016). Development of energy- and resource-saving production technology of high-strength strands. *Metallurgical and Mining Industry*, no. 5, pp. 100–104 [in English].
5. Sychkov, A.B., Parusov, V.V., Nesterenko, A.M. et al. (2009). High carbon wire rod for the manufacture of high-strength reinforcing ropes. Bendery: Poligrafist, 608 p. [in Russian].
6. Parusov V.V., Parusov, O.V., Sychkov, A.B. (2010). Boron steel for high strength fasteners. Dnepropetrovsk: Art-press, 160 p. [in Russian].
7. Lutsenko, V.A., Anelkin, N.I., Golubenko, T.N., Shcherbakov, V.I., Lutsenko, O.V. (2012). Morphology modification of carbon chromium-molybdenum steel structure influenced by heat treatment. *CIS Iron and Steel Review*, no. 1, pp. 38–40 [in English].
8. Levchenko, G.V., Orobtshev, A.Yu., Horoshilov, V.V. (2014). Mastering the production of rolled steel with a screw profile of strength class A600 for anchoring mining workings. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost. Metallurgical and Mining Industry*, no. 2, pp. 49–52 [in Russian].
9. Bobyr, S.V., Dyomina, E.G., Besednov, S.V., Strizhko, O.D. (2014). The influence of chemical composition, hardness and type of surface defects on the resistance of press dies to 10,000 tons of low alloy steels. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost. Metallurgical and Mining Industry*, no. 1, pp. 65–69 [in Russian].
10. Bobyr, S.V., Nefedeva, E.E., Loshkarev, D.V. (2015). The modeling and optimization of tempering 17H5MA tool hot deformation. *Fundamentalnye i prikladnyye problemy chernoy metallurgii. Sb. nauch. tr. Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy. Collection of scientific works*. Iss. 30, pp. 324–331 [in Russian].
11. Bobyr, S.V., Dyomina, E.G., Lipatov, I.Yu. (2012). Influence of heat treatment on structure and properties low-alloyed die steels. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost. Metallurgical and Mining Industry*, no. 4, pp. 69–73 [in Russian].

Received 13.09.2019

Аннотация

Э.В. Парусов, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., зав. отделом, e-mail: tometal@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-4560-2043>;
Г.В. Левченко, д-р техн. наук, проф., зав. лабораторией, e-mail: isi@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0003-1173-5320>; **В.А. Луценко**, д-р техн. наук, вед. науч. сотр., e-mail: lutsenkovlad2@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4604-5592>; **С.В. Бобырь**, д-р техн. наук, вед. науч. сотр., e-mail: svbobyry07@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6816-1554>; **О.В. Парусов**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., e-mail: tometal@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-9879-6179>;
И.Н. Чуйко, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., e-mail: ferrosplav@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-4753-614X>; **Т.Н. Голубенко**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., e-mail: sumer@i.ua, <https://orcid.org/0000-0002-3583-211X>

*Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины
(Днепр, Украина)*

Научные и технологические основы производства высокоэффективных видов сортового и бунтового проката

Представлена история основания, развития и главные научные направления деятельности отдела термической обработки металла для машиностроения Института черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины. Показано, что специалистами отдела сделан значительный вклад в разработку научных основ создания технологических процессов производства высококачественного металлопроката широкого марочного состава и различного назначения. Результаты фундаментальных исследований используются при разработке и совершенствовании технологии производства горячекатаного сортового и бунтового проката, характеризующегося повышенными потребительскими свойствами, масштабом и результативностью. Научные разработки, основанные на дальнейшем развитии представлений о современном материаловедении, нашли свою практическую реализацию на многих металлургических, метизных и машиностроительных предприятиях. Промышленно внедренные инновационные режимы деформационно-термической и термической обработки сталей как с прокатного, так и отдельного нагревов, в том числе с применением криогенной обработки, обусловили повышение их класса прочности, долговечности, износо- и термостойкости в процессе эксплуатации. Разработаны методики ультразвукового контроля и дифференциального магнитного анализа легированных сталей; предложены авторские методики расчета фазового состава и температур фазово-структурных превращений в легированных и углеродистых сталях; созданы компьютерные программные оболочки для построения изотермических и термокинетических диаграмм распада метастабильного аустенита, моделирования условий реального производственного процесса с возможностью прогнозирования структуры и механических свойств проката различного назначения в зависимости от химического состава стали и параметров технологического процесса. Внедренные технологические решения соответствуют уровню лучших мировых аналогов, а результаты фундаментальных исследований сделали весомый вклад в повышение энерго- и ресурсосбережения металлургической, метизной и машиностроительной отраслей промышленности Украины.

Ключевые слова

Бунтовой прокат, сортовой прокат, деформационно-термическая обработка, энергосбережение, фазовые превращения, структурные превращения, механические свойства, канаты, проволока, металлокорд, валки, прошивные оправки, холодная объемная штамповка.

Summary

E.V. Parusov, PhD (Engin.), Senior Research Scientist, Head of Department, e-mail: tometal@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-4560-2043>; **G.V. Levchenko**, Dr. Sci. (Engin.), Professor, Head of Laboratory, e-mail: isi@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0003-1173-5320>; **V.A. Lutsenko**, Dr. Sci. (Engin.), Leading Researcher, e-mail: lutsenkovlad2@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4604-5592>; **S.V. Bobyr**, Dr. Sci. (Engin.), Leading Researcher, e-mail: svbobyr07@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6816-1554>; **O.V. Parusov**, PhD (Engin.), Senior Researcher, e-mail: tometal@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-9879-6179>; **I.N. Chuiko**, PhD (Engin.), Senior Researcher, e-mail: ferrosplav@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-4753-614X>; **T.N. Golubenko**, PhD (Engin.), Senior Researcher, e-mail: sumer@i.ua, <https://orcid.org/0000-0002-3583-211X>

Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov of the NAS of Ukraine (Dnipro, Ukraine)

Scientific and technological fundamentals of the production of highly efficient types of construction steel and wire rod

The history of the foundation, development and the main scientific areas of activity of the department of heat treatment of metal for mechanical engineering of the Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov of the NAS of Ukraine are presented. It is shown, that the department specialists made a significant contribution to the development of the scientific foundations for the creation of technological processes for the production of high-quality rolled metal of a wide brand composition and for various purposes. The results of basic research are used in the development and improvement of the technology for the production of hot-rolled construction steel and wire rod, which are characterized by the increased consumer properties, scale and effectiveness. The scientific developments based on further development of ideas about modern materials science have found their practical implementation at many metallurgical, hardware and machine-building enterprises. The

industrially introduced innovative modes of deformation-heat and heat treatment of steels from both rolling and individual heating, including using cryogenic treatment, led to an increase in their strength class, durability, wear and heat resistance during operation. The methods of ultrasonic testing and differential magnetic analysis of alloy steels were developed; author's methods are proposed for calculating the phase composition and temperatures of phase-structural transformations in alloyed and carbon steels; computer program were created for constructing isothermal and thermokinetic diagrams of the decomposition of metastable austenite, modeling the conditions of a real production process with the ability to predict the structure and mechanical properties of rolled products for various purposes depending on the chemical composition of steel and process parameters. The implemented technological solutions correspond to the level of the best world analogues, and the results of basic research have made a significant contribution to improving the energy and resource saving of the metallurgical, hardware and machine-building industries of Ukraine.

Keywords

Wire rod, construction steel, deformation-heat treatment, energy saving, phase transformations, structural transformations, mechanical properties, ropes, wire, steel cord, rolls, piercing mandrels, cold forging.

Прокатный стан – источник познания вибродинамических процессов

Задача статьи состоит в том, чтобы на примере широкополосного стана 1680 металлургического комбината «Запорожсталь» показать, что натурные измерения позволяют получить весьма ценную и полезную информацию о вибродинамических процессах в оборудовании. Для достижения этой цели в качестве основных параметров на стане измерялись момент сил упругости на валу между двигателем и редуктором и вибрация в различных точках корпуса шестеренной клетки и редуктора. Это позволило установить особенности переходных процессов во время захвата полосы валками и при взаимодействии клеток черновой группы через толстую прокатываемую полосу. Показана связь износа и зазоров в линии привода с временем запаздывания реакции вибродатчиков на ударную нагрузку при захвате полосы, которое принято в качестве диагностического признака. Выявлена корреляционная зависимость максимального динамического момента при захвате полосы от момента в установившемся режиме прокатки, позволяющая вести мониторинг нагрузок с учетом технического состояния линии привода. Показано, что совместные измерения момента и вибрации в разных точках редуктора и шестеренной клетки в переходных режимах позволяют установить взаимосвязи в упругих системах прокатной клетки, обладающие диагностическими свойствами. Путем измерений моментов и вибрации в черновых клетях показана эффективность уменьшения ударных нагрузок при прокатке слябов с фигурной передней кромкой. Значение натурных измерений в действующих прокатных станах состоит не только в установлении фактической картины колебательных процессов и уровня нагрузок, но и в разработке математических и компьютерных моделей заполнения полосой непрерывной группы клеток, статистическом моделировании, поиске новых способов диагностирования оборудования. В больших массивах измерений всегда содержатся скрытые закономерности, обладающие новизной и существенной информативностью. Приведены примеры научных выводов на базе измерений.

Ключевые слова: прокатный стан, измерения, динамика, колебания, максимальный момент, диагностика, мониторинг, моделирование.

Введение. Известно, что захват полосы валками сопровождается существенными ударными нагрузками, прежде всего в линии главного привода клетки прокатного стана. Общеизвестно, что максимальные пиковые моменты в этот период являются одним из основных факторов, отрицательно влияющих на долговечность оборудования. В связи с этим много внимания уделяется исследованиям динамических процессов при захвате полосы и во время заполнения непрерывной группы клеток полосой. Однако опытно-промышленные измерения динамических параметров в клетях прокатных станов выполняются преимущественно при решении конкретной задачи, например, определении максимальных нагрузок в линии главного привода валков, если происходят поломки оборудования. При таком ограниченном подходе к измерениям не удастся глубоко и детально исследовать динамику оборудования в широком диапазоне ее проявления с учетом разнообразия технологии и состояния оборудования.

Поставленная задача состоит в том, чтобы показать насколько разнообразную и полезную информацию о динамических процессах можно получить путем опытно-промышленных натурных измерений на примере одного из старейших станов, работающего с 1938 года. Непрерывный широкополосный стан го-

рячей прокатки 1680 комбината «Запорожсталь» за свою историю прошел ряд этапов совершенствования и развития. С скромный 10-летний юбилей стана в 1948 году был отмечен его полным послевоенным восстановлением и выпуском двух почтовых марок. Наступление 20-летия знаменательно тем, что стан стал первенцем среди станов, на котором во всех клетях были выполнены измерения крутящего момента [1, 2]. Впервые также был установлен факт упругих крутильных колебаний механического момента на шпинделях и промежуточном валу, их частота и затухание, определены коэффициенты динамичности, отмечено влияние зазоров в шпиндельном сочленении на увеличение ударных нагрузок. С этого времени периодическое внедрение новых технологий сопровождалось системными измерениями динамических процессов.

Результаты исследований. Наиболее интенсивные и регулярные исследования путем опытно-промышленных измерений на стане выполнялись с 1990 года, когда внедрялись новые энергосберегающие технологии, в частности, прокатка слябов транзитом без дополнительного нагрева в печах, непрерывная прокатка в парах черновых клеток, освоение работы промежуточного перемоточного устройства типа "Coilbox". Главное в методике проведения работ

заключалось в измерениях крутящего момента в прокатных клетях на валу между редуктором и двигателем и вибрации корпусного оборудования вдоль линии привода с регистрацией параметров на персональный компьютер. Одновременно фиксировались технологические параметры (сорторазмер, скорость прокатки, обжатие и др.). Массовые измерения с учетом особенностей технологий и состояния оборудования, новые приемы обработки параметров и визуализации позволили установить ряд особенностей переходных процессов и их информативности, количественных соотношений и статистических закономерностей. Цель подобных измерений состоит в том, чтобы на основании знаний о фактических процессах совершенствовать режимы работы оборудования, технологию, улучшать качество проката и развивать способы диагностики.

Главные выводы и решения, представляющие собой новые знания, состоят в следующем.

1. При заполнении и непрерывной прокатке толстой полосы (от 110 до 50 мм) удвоенной длины в парах черновых клетей установлены особенности динамики взаимодействия главных линий (рис. 1). Между клетями ДУО – № 1 при небольшом расстоянии (6 м) проявляется существенная «отдача» через толстую полосу от быстрого формирования подпора или натяжения. Особенность технологии в паре ДУО – № 1 состоит в том, что полоса (сляб) удвоенной длины с целью сохранения температуры задается в клеть ДУО с большей скоростью, чем при одиночной прокатке слэбов обычной длины. Это приводит к замыканию зазоров и увеличению ударных нагрузок, что явилось поводом создания способа диагностирования состояния шпиндельного участка линии привода.

Расстояние между другими клетями большее (19 и 25 м), полоса тоньше, однако реакция клетей № 2 и № 3 заметна в виде биений момента. В клетях № 3 и № 4 после одного-двух первых пиков момент кратковременно падает до нуля, в отдельные периоды наблюдаются обратные удары. При определенных условиях они проявляются систематически. Это указывает на увеличение износа и зазоров в зубчатых зацеплениях на участке двигатель – редуктор. Для их диагностирования предложен способ, учитывающий изменение формы и вида колебаний.

2. Совместные измерения вибрации корпусного

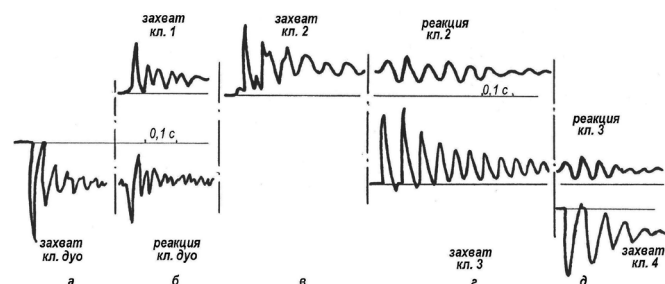


Рис. 1. Взаимодействие главных линий клетей ДУО – № 1, № 2 – № 3 и № 3 – № 4 стана 1680 при захвате полосы валками в режиме непрерывной прокатки

оборудования вдоль линии привода и момента показали запаздывание реакции участков линии привода по отношению к ударной нагрузке в клетях при захвате полосы (рис. 2). Установлено, чем больше износ и зазоры, тем больше время запаздывания, то есть тем большее время необходимо на замыкание зазоров. В результате разработан и путем измерений проверен новый не имеющий аналогов диагностический признак – время запаздывания и способы диагностирования состояния сочленений по этому признаку [3].

3. Более глубокие познания вибродинамических процессов на основе массовых измерений привели к обоснованию и разработке нового направления – диагностирования состояния прокатного оборудования и технологии в переходных режимах работы. Разработаны два десятка новых способов. В частности, определение состояния оборудования линии привода и стабильности технологии прокатки по трем коэффициентам вариации: динамического момента v_d , статического момента $v_{ст}$ и коэффициента динамичности v_k [4].

4. Установлена корреляционная связь максимального динамического момента M_d при захвате полосы валками и момента $M_{ст}$ в установившемся режиме прокатки (рис. 3). Формирование корреляционных полей $\{M_d, M_{ст}\}$ подтверждается статистическим моделированием динамики захвата полосы валками. В результате разработан расчетно-эмпирический метод определения M_d , в нем, что очень важно, учитывается фактический, то есть измеряемый момент $M_{ст}$ главного привода [5].

Значение этого метода состоит в следующем. Ввиду отсутствия на станах штатных измерителей механического крутящего момента, оборудование эксплуатируется без знания уровня максимальных динамических нагрузок M_d . Последние существенно зависят от технологии и рассеяния ее параметров и состояния оборудования. Нестабильность технологии в партиях полос одной плавки, а также

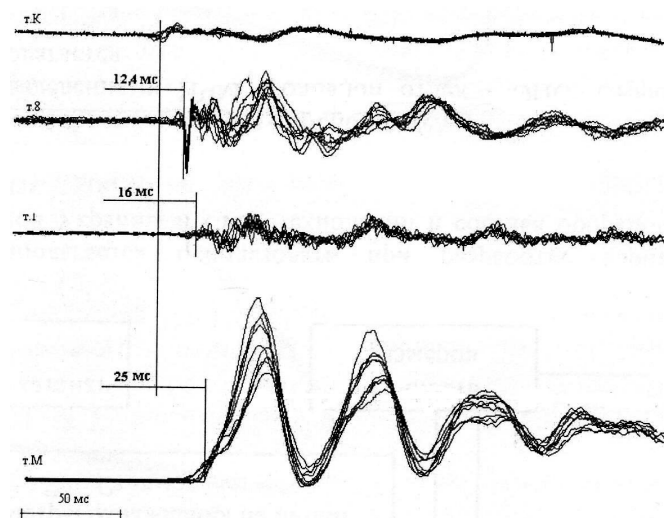


Рис. 2. Наложение 10-ти переходных процессов при захвате полосы в клетях № 3: вибрация рабочей клетки (K), шестеренной клетки (8), опоры быстходной шестерни редуктора (1); M – момент сил упругости

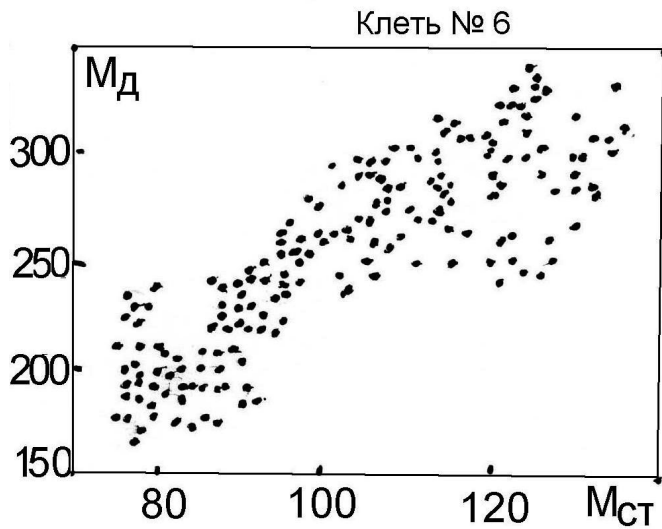


Рис. 3. Корреляционное поле измеренных значений максимального момента сил упругости M_d на промежуточном валу и момента $M_{ст}$ в установившемся режиме прокатки (кН·м)

переходы к прокатке других сортразмеров учитываются в фактических значениях $M_{ст}$. Износ и зазоры определяются путем их диагностирования. С учетом этих факторов путем статистического моделирования с большой вероятностью определяются значения M_d , ведется построение корреляционных полей и их аппроксимация $M_d(M_{ст})$.

Знания зависимости $M_d(M_{ст})$ в каждой клетке непрерывного стана позволяет: а) вести мониторинг M_d и прогнозировать развитие ударных нагрузок; б) корректировать режим обжатий, если в одной-двух клетях M_d приближается к предельно допускаемому значению; в) оценивать возможность прокатки новых сортразмеров полос по динамическому критерию; г) формировать годовую упорядоченную нагрузочную диаграмму, необходимую для расчета ресурса оборудования и на прочность.

5. На основании измерений установлена взаимосвязь переходных процессов в упругих системах: линии привода, станины клетки, опоры валков – боковые накладке, болты редуктора и вибрации в ряде точек оборудования. При нормальном техническом состоянии узлов линии (непосредственно после ремонта) во всех системах наблюдаются пик ударной нагрузки и последующие затухающие колебания с частотой линии главного привода (рис. 4). По мере работы стана и износа сочленений вид колебаний заметно искажается. В частности, появляется высокочастотная составляющая, обусловленная увеличивающимися зазорами, изменяется амплитуда и период колебаний. В итоге по тренду вида процессов предложено делать достаточно правильное заключение о состоянии участков шпиндель – редуктор и редуктор – двигатель [6].

6. Установлено, что от точности настройки деформационно-скоростного режима чистовых клеток зависит динамика взаимодействия главных линий через прокатываемую полосу в период заполнения группы полосой. Измерениями показано, что изменение скорости клеток в установившемся режиме

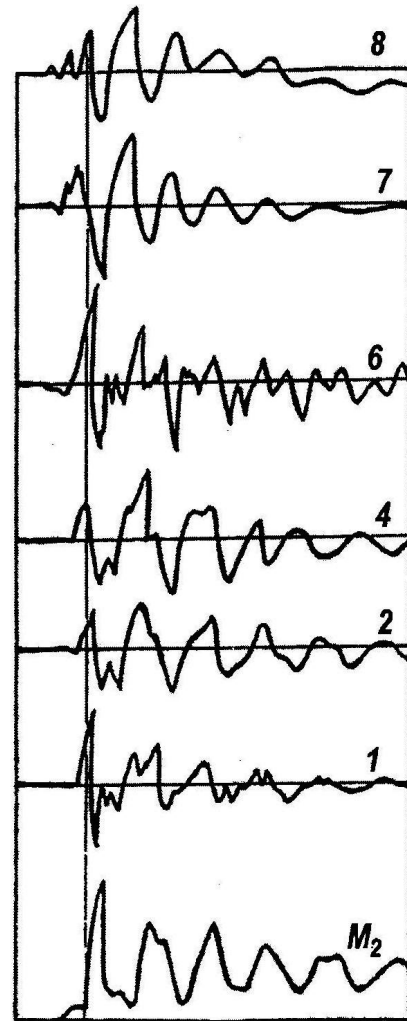


Рис. 4. Совместная запись момента сил упругости M на промежуточном валу между двигателем и редуктором и вибрации шестеренной клетки (7, 8) и корпуса редуктора (1, 2, 4) при захвате полосы валками в клетке № 2

прокатки приводит к отклонению по длине толщины готовой полосы на выходе из стана до 0,3–0,5 мм. Разработан метод определения координаты начала изменения толщины и ее корректировки при последующей обработке на непрерывном стане холодной прокатки.

7. В черновых клетях стана выполнена опытная прокатка слэбов с фигурной передней кромкой. Измерениями показана существенная эффективность такого способа. В клетях ДУО № 1, 2 и 3 относительная динамическая составляющая ударной нагрузки уменьшалась от 1,4–2,2 до 2,1–3,8 раза по сравнению с прокаткой слэбов с прямой кромкой (рис. 5). Предложены способы формирования фигурной кромки в потоке производства слэбов [3, 4].

Выводы

Выявленные путем измерений новые особенности и закономерности переходных процессов на стане 1680 способствовали в свою очередь развитию теоретических исследований и решению ряда задач.

1. Обосновать и разработать новое направление

в диагностике технического состояния оборудования прокатных станов, основанное на переходных процессах при захвате полосы валками и взаимодействии клетей через прокатываемую полосу. Предложены способы диагностирования, разработаны алгоритмы и правила распознавания ТС оборудования, интегрируемые в существующие системы диагностики роторных машин.

2. Разработать математическую и компьютерную модели переходных процессов в линии привода валков совместно с динамикой в зубчатом зацеплении и цапф редуктора. Они являются также диагностическими моделями для исследования влияния различных факторов (поломка зубьев, зазоры в подшипниках и др.) на колебательные процессы и поиска новых способов и методов диагностирования.

3. Разработать компьютерную программу статистического моделирования динамики захвата полосы валками и на ее основе метод построения корреляционных полей и мониторинга максимальных динамических нагрузок на всех участках линии привода.

4. Впервые создать компьютерную модель (в абсолютных значениях переменных) динамики взаимодействия клетей во время заполнения, прокатки и освобождения полосой непрерывной группы и исследовать особенности процесса транспортного запаздывания, переноса толщины и формирования межклетевых натяжений совместно с толщиной, которые на станах горячей прокатки непосредственно не измеряются.

5. Идентифицировать математические модели, включая статистические и компьютерные программы, адаптировать их к конкретным станам и обеспечить высокую точность и достоверность расчетов.

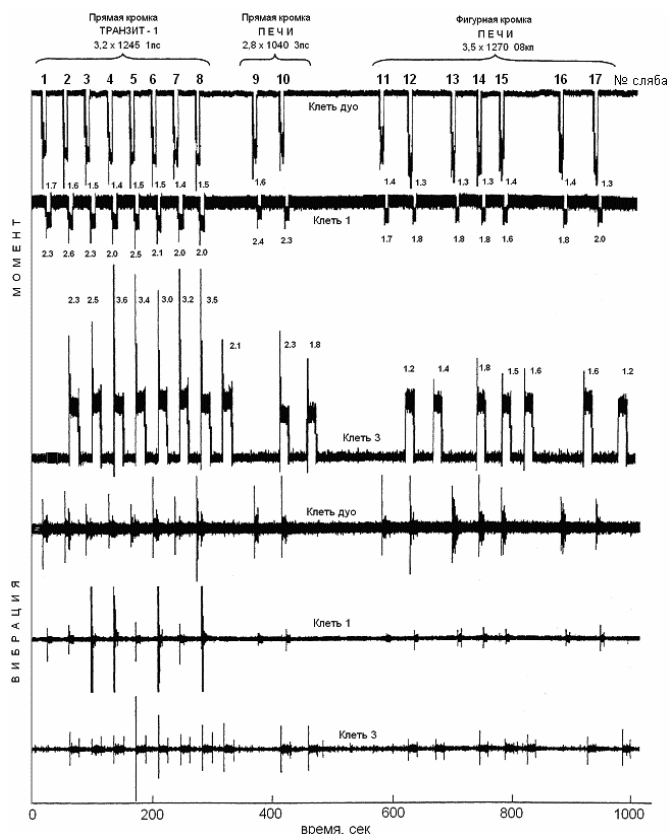
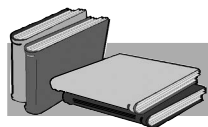


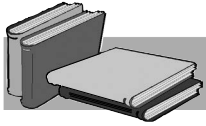
Рис. 5. Момент сил упругости на промежуточном валу и вибрация корпуса редуктора в клетях ДУО – № 1 и 3 стана 1680 при прокатке слэбов с прямой и фигурной передней кромкой. Значения коэффициента динамичности для каждого слэба приведены рядом с кривыми



ЛИТЕРАТУРА

1. Кожевников С.Н., Скичко П.Я. Экспериментальное исследование главных линий чистой группы клетей непрерывного тонколистового стана 1680 завода «Запорожсталь». *Изв. вузов. Черная металлургия*. 1961. № 12. С. 179–184.
2. Кожевников С.Н. Динамика машин с упругими звеньями. Киев: АН УССР, 1961. 312 с.
3. Веренев В.В., Большаков В.И., Маншилин А.М., Путники А.Ю., Мацко С.В. Динамические процессы в клетях широкополосного стана 1680. Днепропетровск: ИМА–пресс, 2011. 184 с.
4. Веренев В.В. Снижение динамических нагрузок и диагностика широкополосных станов в переходных режимах. Никополь: СПД Фельдман О.О., 2014. 203 с.
5. Веренев В.В., Подобедов Н.И., Коренной В.В. Расчетно-эмпирический метод определения динамических нагрузок в прокатных клетях. *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. ИЧМ. 2014. Вып. 28. С. 206–210.
6. Веренев В.В., Баглай А.В. Динамика парциальных упругих систем в прокатных клетях. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2018. № 7. С. 104–107.

Поступила 19.09.2019



REFERENCES

1. Kozhevnikov, S.N., Skichko, P.Ya. (1961). An experimental study of the main lines of the finishing group of stands of a continuous sheet mill 1680 of the Zaporizhstal plant. *Izv. universities. Ferrous metallurgy*, no. 12, pp. 179–184 [in Russian].
2. Kozhevnikov, S.N. (1961). The dynamics of machines with elastic links. Kyiv: AN USSR, 312 p. [in Russian].
3. Verenev V.V., Bolshakov V.I., Manshilin A.M., Putnoki A.Yu., Matsko, S.V. (2011). Dynamic processes in the stands of broadband mill 1680. Dnepropetrovsk: IMA – press, 184 p. [in Russian].
4. Verenev, V.V. (2014). Dynamic load reduction and diagnostics of broadband mills in transient conditions. Nikopol: SPD Feldman O.O., 203 p. [in Russian].
5. Verenev, V.V., Podobedov, N.I., Korennoy, V.V. (2014). Calculation-empirical method for determining dynamic loads in rolling stands. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*. ISI, iss. 28, pp. 206–210 [in Russian].
6. Verenev, V.V., Baglay, A.V. (2018). The dynamics of partial elastic systems in rolling stands. *Metallurgical and mining industry*, no. 7, pp. 104–107 [in Russian].

Received 19.09.2019

Анотація

В.В. Вереньов, д-р техн. наук, ст. наук. співр., ст. наук. співр.,
e-mail: verenev0704@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2561-5365>

Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України (Дніпро,
Україна)

Прокатний стан – джерело пізнання вібродинамічних процесів

Задача статті полягає в тому, щоб на прикладі широкосмугового стану 1680 металургійного комбінату «Запоріжсталь» показати, що натурні вимірювання дозволяють отримати дуже цінну і корисну інформацію про вібродинамічні процеси в обладнанні. Для досягнення мети в якості основних параметрів на стані вимірювалися момент сил пружності на валу між двигуном та редуктором і вібрація в різних точках корпусу шестеренної кліті і редуктора. Це дозволило встановити особливості перехідних процесів під час захоплення полоси валками і при взаємодії клітей чорнової групи через товсту полосу. Показано зв'язок зносу і зазорів в лінії приводу з часом запізнювання реакції вібродатчиків на ударне навантаження при захопленні полоси, який прийнято в якості діагностичної ознаки. Виявлено кореляційну залежність максимального динамічного моменту при захопленні полоси валками від моменту в сталому режимі прокатки, що дозволяє вести моніторинг навантажень з урахуванням технічного стану лінії приводу. Показано значення спільних вимірів моменту і вібрації для встановлення взаємозв'язків пружних систем в перехідних режимах, які мають діагностичні властивості. Шляхом вимірювань моментів та вібрації в чорнових клітях показано ефективність зменшення ударних навантажень при прокатці слябів з фігурною передньою кромкою. Значення натурних вимірювань в діючих прокатних станах полягає не тільки у встановленні фактичної картини коливальних процесів і рівня навантажень, але і у розробці математичних і комп'ютерних моделей заповнення полозою безперервної групи клітей, статистичному моделюванні, пошуку нових способів діагностування обладнання. У великих масивах вимірювань завжди містяться приховані закономірності, які мають важливу новизну та інформативність. Наведено приклади наукових висновків на базі вимірювань.

Ключові слова

Прокатний стан, вимірювання, динаміка, колювання, максимальний момент, діагностика, моніторинг, моделювання.

Summary

V.V. Verenev, Dr. Sci. (Engin.), Senior Research Scientist, Senior Researcher,
e-mail: verenev0704@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2561-5365>

Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov of the NAS of Ukraine (Dnipro, Ukraine)

Rolling mill – source of knowledge of vibrodynamic processes

Using the example of the wide strip mill 1680 of the Zaporizhstal metallurgical plant, it is shown that field measurements allow one to obtain very valuable and useful information about the vibrodynamic processes in the equipment. As the main parameters of the mill, the moment of elastic forces on the shaft between the engine and the gearbox and the vibration at different points of the gear stand and gearbox housing were measured. The features of transients during the capture of the strip by rolls and during the interaction of the stands of the rough group through a thick rolling strip are established. The relationship of wear and gaps in the drive line with the time delay of the vibration sensors reaction to the shock load when capturing the strip is shown. The correlation dependence of the maximum dynamic moment when the strip is captured on the moment in the steady rolling mode is revealed, which allows monitoring loads taking into account the technical condition of the drive line. The value of joint measurements of the moment and vibration for the establishment of interconnections of elastic systems in transition modes, in particular, when rolling slabs with a curly leading edge, is shown. The importance of full-scale measurements in existing rolling mills consists not only in establishing the actual picture of oscillatory processes and the load level, but also in developing mathematical and computer models for filling a continuous group of stands with a strip, statistical modeling, and searching for new ways to test equipment. Large arrays of measurements always contain hidden patterns that have novelty and substantial informational content. Examples of scientific conclusions based on the measurements are given.

Keywords

Rolling mill, measurements, dynamics, oscillations, maximum torque, diagnostics, monitoring, modeling.

О.І. Бабаченко, д-р техн. наук, ст. наук. співр., директор, e-mail: a_babachenko@i.ua, <https://orcid.org/0000-0003-4710-0343>

Г.А. Кононенко, канд. техн. наук, ст. наук. співр., e-mail: perlit@ua.fm, <https://orcid.org/0000-0001-7446-4105>

К.Г. Дьоміна, канд. техн. наук, ст. наук. співр., e-mail: katya20@ua.fm, <https://orcid.org/0000-0001-9668-8169>

Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України (Дніпро, Україна)

Розробка хімічного складу та вдосконалення технології виробництва для підвищення експлуатаційної надійності і довговічності залізничної металопродукції

Розвиток теоретичних основ та практичні розробки параметрів процесу та устаткування для термічної обробки прокату в процесі його масового виробництва – основний напрям роботи відділу проблем деформаційно-термічної обробки конструкційних сталей. Відділ під керівництвом К.Ф. Стародубова було засновано в Інституті чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, який визначено як головна організація з виробництва та якості металопродукції для залізничного транспорту. За останні роки відділом розроблено нові сталі для елементів вантажних вагонів нового покоління та технологічний процес їх термічної обробки, що забезпечує можливість виробництва високоміцного холодостійкого прокату без використання дорогих легуючих елементів. Для залізничних коліс розроблено сталі з різними системами легування для різних умов експлуатації. Розроблені параметри термічної обробки дозволяють досягти заданого комплексу властивостей. Науково обґрунтовано та підтверджено позитивний вплив підвищення ступеню деформації в центральних обсягах металу ободу на в'язкість руйнування K_{IC} . Створено модель розрахунку температурних полів в процесі прискореного охолодження ободу залізничного колеса, обґрунтовано раціональні режими термічного зміцнення залізничних коліс в залежності від хімічного складу сталі для утворення однорідної структури по перерізу. Досліджено особливості дендритної будови вихідної безперервнолитой заготовки Ø 470 мм для виробництва залізничних осей та осьових заготовок Ø 380 і 220 мм в умовах ПАТ «ІНТЕРПАЙП НТЗ» за допомогою методу оцінки деформованого стану металу. Визначено ступінь деформаційного пророблення металу по перерізу осьових заготовок та розроблено рекомендації щодо підвищення втомної міцності залізничних осей виробництва ПАТ «ІНТЕРПАЙП НТЗ». В останні роки ведуться роботи щодо вдосконалення хімічного складу та технології термічної обробки залізничних рейок вітчизняного виробництва.

Ключові слова: термічна обробка прокату, масове виробництво, нові сталі, залізничні колеса, залізничні осі, залізничні рейки.

Стан питання. У 1948 р. у складі Дніпропетровського філіалу Інституту чорної металургії була організована термічна лабораторія, яку очолив член-кореспондент АН УРСР К.Ф. Стародубов. Таким чином було покладено початок розробки нового переділу в чорній металургії – термічної обробки прокату в процесі його масового виробництва. Одним з перших співробітників під керівництвом К.Ф. Стародубова був І.Г. Узлов. Згодом під його керівництвом виконувались науково-технічні дослідження та технологічні розробки нових процесів термічного зміцнення залізничних коліс, які враховують нові більш високі вимоги до їх експлуатаційних властивостей. З ім'ям І.Г. Узлова пов'язана теоретична розробка та практичне впровадження нової підгалузі металургії – термічної обробки прокату в умовах його масового виробництва [1].

Ще у 60-ті роки минулого сторіччя Інститут чорної металургії був визначений як головна організація з виробництва і якості металопродукції для залізничного транспорту, жорсткість умов експлуатації якого обумовлює необхідність підвищення вимог, що пред'являються споживачами до всіх його елементів,

у тому числі і до залізничних осей, коліс і бандажів, елементів кузова вагонів.

Мета роботи – аналіз сучасних досягнень у напрямі підвищення показників надійності та довговічності металопродукції залізничного призначення шляхом вдосконалення існуючих та розробки нових сталей та технологій їх виробництва на прикладі Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України (ІЧМ НАН України).

Методика досліджень – аналіз результатів науково-дослідних та прикладних робіт за публікаціями відділу проблем деформаційно-термічної обробки конструкційних сталей ІЧМ НАН України.

Основні результати досліджень. За останні роки в роботах, що виконувались відділом проблем деформаційно-термічної обробки конструкційних сталей Інституту (ВКС ІЧМ НАН України), отримали подальший розвиток наукові уявлення про протікання бейнітного перетворення в вуглецевих сталях при безперервному охолодженні. Встановлено, що утворення бейнітних структур в низьковуглецевих сталях можливе при швидкостях охолодження нижче критичних при наявності додаткових центрів зародження,

якими можуть служити карбонітриди титану і нітриди алюмінію (рис. 1) [2].

Визначено основні фактори, що впливають на формування заданого структурного стану (рівномірної структури голчастого фериту з одночасним стимулюванням його інтрагранулярного зародження всередині аустенітного зерна при проміжному перетворенні вуглецевих і низьколегованих сталей):

- розмір аустенітного зерна;
- кількість, розподіл, морфологія часток – центрів зародження;
- оптимальні швидкості охолодження.

Розроблено технологічний процес термічної обробки низьковуглецевих сталей масового призначення, який забезпечує можливість виробництва високоміцного холодостійкого прокату для кузовів вантажних вагонів нового покоління $\sigma_T \geq 500 \text{ Н/мм}^2$, $KCU^{-60} \geq 29 \text{ Дж/см}^2$ та $\sigma_{-1} \approx 350 \text{ Н/мм}^2$ без використання дорогих легуючих елементів (нікель, хром, ванадій, ніобій та ін.) – таблиця.

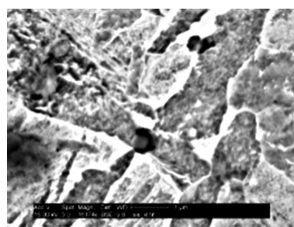
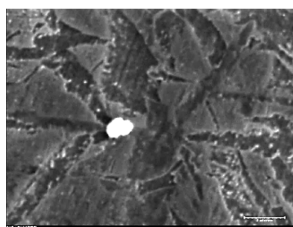


Рис. 1. Структура голчастого фериту, отримана з мікролегованої низьковуглецевої сталі в процесі бейнітного перетворення з використанням Ti (C, N) і AlN як центрів зародження голчастого фериту

Також у ВКС ІЧМ НАН України отримали розвиток напрями:

- розробка і впровадження нових процесів термічної обробки суцільнокатаних коліс, центрів, бандажів та інших виробів залізничного призначення, що забезпечують підвищення їх службових властивостей і зниження енерговитрат на їх виробництво;

- удосконалення існуючих та розробка нових марок сталей для виробництва суцільнокатаних коліс, центрів і бандажів, що забезпечують високі значення

зносостійкості, втомної міцності, холодостійкості і підвищений опір термічному впливу;

- дослідження особливостей структуроутворення в процесі кристалізації та деформаційно-термічних обробок вуглецевих, мікро-, низько- і легованих сталей;

- розвиток методу оцінки ступеня деформаційного пророблення прокату з вуглецевих і низьколегованих сталей за зміною параметрів слідів дендритної структури;

- дослідження впливу структурної спадковості на формування однорідної і дрібнозернистої структури та комплекс механічних властивостей у вуглецевих і легованих сталях;

- проведення досліджень, спрямованих на визначення природи дефектів та причин їх утворення в різних видах металопродукції.

Залізничні колеса безпосередньо сприймають нормальні, динамічні та теплові навантаження при взаємодії з рейкою, умови їх роботи постійно ускладнюються з підвищенням швидкості руху та навантажень на вісь, тому вимоги до них постійно зростають. Протягом багатьох десятиріч ВКС ІЧМ НАН України займався вирішенням технологічних і технічних завдань зі створення технологій та устаткування для колесо-бандажного виробництва, в тому числі для колесопрокатного цеху Нижньодніпровського трубопрокатного заводу. І до сьогоднішнього дня ВКС ІЧМ НАН України тісно співпрацює з основним вітчизняним виробником металопродукції залізничного призначення – ПАТ «ІНТЕРПАЙП НТЗ» у питаннях науково обґрунтованого вдосконалення технології виробництва для підвищення показників якості.

Одним з основних показників довговічності залізничних коліс є стійкість до утворення дефектів на поверхні кочення. З існуючих типів вищербин в останні десятиріччя найбільш поширеними є дефекти, які утворилися в результаті теплового впливу на поверхню катання колеса при гальмуванні.

На основі результатів фізичного моделювання процесу гальмування колеса встановлено нелінійну залежність глибини мартенситного шару, який утворюється при гальмуванні залізничних коліс і визначає їх стійкість до утворення на поверхні катання

Механічні властивості сталі Ст3 в різному стані у порівнянні зі сталлю аналогом 10ХСНД

Матеріал	Границя плинності, σ_T , Н/мм ²	Границя міцності, σ_B , Н/мм ²	Відносне подовження, δ_5 , %	Ударна в'язкість, КСУ, Дж/см ²
	не менше			
Ст3 мікролег. термічнозміцнена	660	840	18	35 (при – 60 °С)
Ст3 мікролег. гарячекатана	355	470	40	90 (при – 70 °С)
Ст3 серійна гарячекатана	255	380	26	29 (при – 20 °С)
Сталь аналог 10ХСНД	390	530	18	29 (при – 70 °С)

дефектів термічного походження, від вмісту в них вуглецю в межах 0,46–0,66 % (рис. 2):

$$t = 15,32 \cdot (C)^2 - 14,15 \cdot (C) + 3,78,$$

де t – товщина мартенситного шару, мм; C – вміст вуглецю, %.

Показано, що збільшення вмісту вуглецю призводить до зниження стійкості залізничних коліс до утворення дефектів на поверхні кочення. Аналіз досліджень світових виробників коліс показав, що найбільш перспективним напрямом удосконалення хімічного складу сталей для залізничних коліс є зниження вмісту вуглецю і використання для зміцнення інших елементів. Встановлено, що одним з таких елементів є кремній.

Розроблено нову марку «К» сталі для залізничних коліс з підвищеним до 0,85–1,05 % вмістом кремнію і марганцю до 0,90 %, мікролеговану ванадієм, що забезпечує твердість ≥ 320 HB і підвищення на 44 % стійкості до утворення дефектів на поверхні кочення [3].

Крім марки «К» було розроблено сталі залізничного призначення з новими системами легування для різних умов експлуатації:

- сталь для високоміцних залізничних бандажів з вмістом вуглецю до 0,7 %, мікролеговану ванадієм (HB > 320) [4];

- сталь для залізничних коліс марки D по AAR M107 / M108 з вмістом вуглецю до 0,78 %, легована хромом і нікелем, з мікролегуванням молібденом (320–400 HB, підвищена зносостійкість);

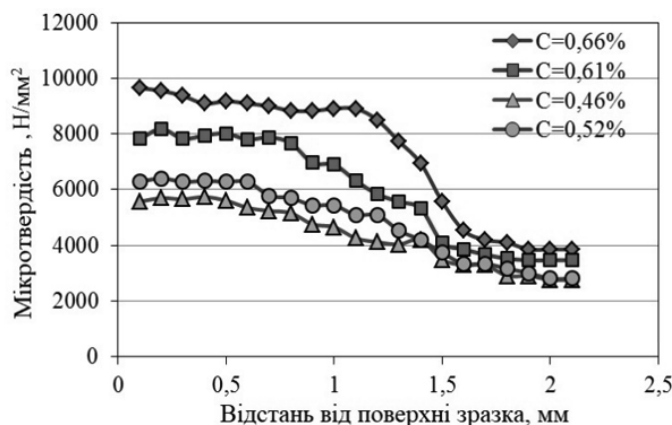
- сталь для залізничних коліс спеціального призначення марки D + з вмістом вуглецю до 0,55 %, легована хромом, нікелем і кремнієм (висока пластичність і стійкість до ударних навантажень при температурі -40 °C) [5].

В рамках комплексного проекту «Розробка та освоєння технологій виробництва і відновлення залізничних коліс, що забезпечують подовження їх ресурсу в різних умовах експлуатації» цільової програми наукових досліджень НАН України «Надійність

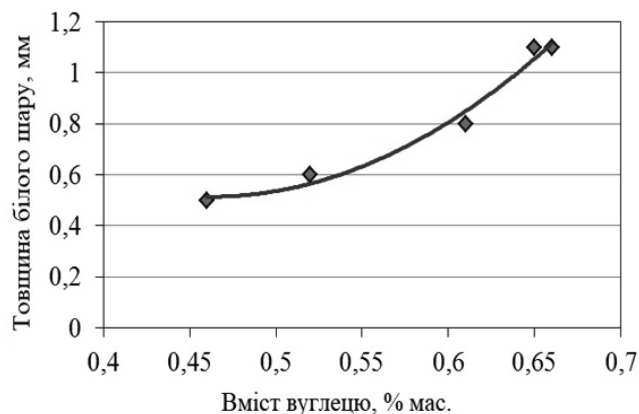
і довговічність матеріалів, конструкцій, обладнання та споруд» (Ресурс-2)» ІЧМ НАН України спільно з Інститутом електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України (м. Київ), Фізико-технологічним інститутом металів та сплавів НАН України (м. Київ), Фізико-механічним інститутом ім. Г.В. Карпенка НАН України (м. Львів) проводить дослідження з удосконалення технології виробництва залізничних коліс для підвищення їх строку служби на залізницях України. В рамках цієї роботи розроблено системи легування з принципово новим способом зміцнення сталі для залізничних коліс – тугоплавкою дисперсною фазою разом з твердорозчинним зміцненням. Встановлено позитивний вплив дослідних хімічних складів на показники в'язкості та пластичності у порівнянні з високоміцною сталлю марки «Т», що нормується ДСТУ ГОСТ 10791-2016. Розроблено режими термічної обробки, що забезпечують високий рівень твердості та пластичності зразків дослідних сталей для залізничних коліс [6].

Для вуглецевих сталей з вмістом вуглецю 0,45–0,6 % встановлено оптимальне співвідношення кремнію і марганцю, яке забезпечує отримання однорідної і дрібнозернистої мікроструктури в готових виробах. Рекомендовано відношення вмісту марганцю до вмісту кремнію $Mn \% \text{мас.} / Si \% \text{мас.}$ на рівні 1,5–2,0 рази для формування в мікроструктурі сприятливого розподілу кремнію та марганцю та зниженню різнозернистості (рис. 3).

Окрім хімічного складу важливим складником рівня показників якості та надійності коліс є режими гарячої пластичної деформації заготовки. Особливістю виробництва залізничних коліс є нерівномірна деформація по перетину обода і мала величина деформації внутрішніх областей, що потрапляють в місця відбору зразків для механічних випробувань, структура сталі яких близька до вихідного литого стану [7]. Це дуже впливає на механічні властивості ободів залізничних коліс. Руйнування обода, маючи катастрофічні наслідки, часто пов'язано з низьким рівнем в'язких властивостей сталі, які залежать від характеристик її мікроструктури, яка визначається



а



б

Рис. 2. Зміна мікротвердості по перетину зразків ободів залізничних коліс з різним вмістом вуглецю, після гальмування на стенді (а), залежність товщини мартенситного шару від вмісту вуглецю в сталі (б)

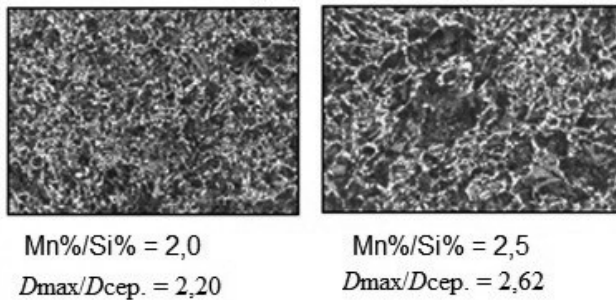
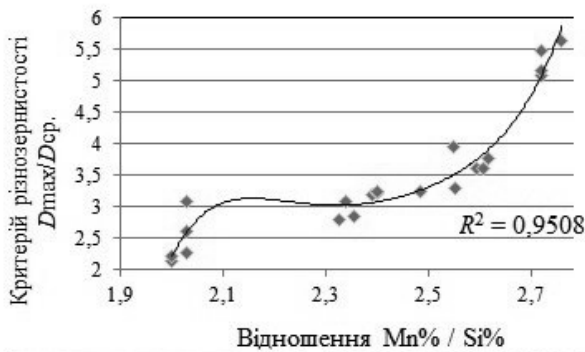


Рис. 3 Закономірність впливу відношення марганцю й кремнію у вуглецевих сталях з 0,45–0,6 % вуглецю на різнозернистість

технологією виготовлення залізничних коліс. В роботах ВКС ІЧМ НАН України було встановлено закономірності формування первинного зерна аустеніту після кристалізації вуглецевих сталей для залізничних коліс з феритно-перлітною структурою. Показано, що в литій сталі формуються первинні міжкристалітні межі – місця стиків дендритних гілок і, вторинні міжкристалітні межі, які перетинають дендрити в довільних напрямках (рис. 4). Походження міжкристалітних меж аустеніту після кристалізації під дією гарячої пластичної деформації і при перекристалізації визначає тип структури, що утворюється при його розпаді [8]. Встановлено переважне утворення перліту на первинних міжкристалітних межах аустеніту, а фериту – на вторинних. На основі цих результатів запропоновано новий режим гарячої пластичної деформації колісної заготовки при виробництві залізничних коліс в умовах колесопрокатного цеху ПАТ «ІНТЕРПАЙП НТЗ», який забезпечує підвищення в'язкості руйнування K_{1c} коліс $\varnothing$ 957 мм і $\varnothing$ 1098 мм відповідно на 22 % і 30 % в порівнянні з існуючою технологією виробництва.

Заключний етап виробництва, що суттєво впливає на надійність та довговічність залізничних коліс, – термічна обробка. В роботах, що виконуються в ІЧМ НАН України, було встановлено закономірності зміни температури за перетином обода залізничного колеса в процесі його прискореного охолодження в залежності від хімічного складу сталі для залізничних коліс методом кінцевих елементів [9].

Встановлено принципову можливість отримання високого комплексу міцності і пластичних властивостей колісної сталі з формуванням однорідної мікроструктури без утворення мартенситу при термічній обробці в умовах ПАТ «ІНТЕРПАЙП НТЗ». Визначено припустимі інтервали швидкостей охолодження по-

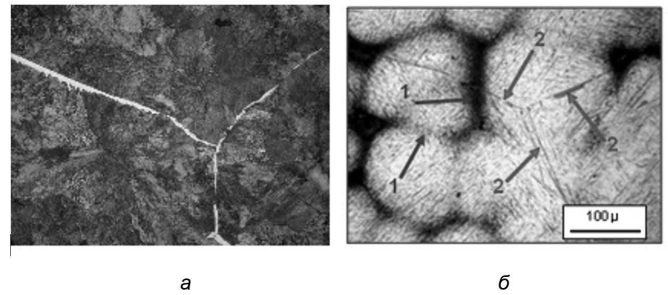


Рис. 4 Мікроструктура (а – травлення ніталем; б – травлення пікратом натрію) літої сталі з 0,52 % С після кристалізації: 1 – первинні межі (міждендритні); 2 – вторинні межі

верхневих і центральних ділянок ободу залізничних коліс при прискореному охолодженні зі сталей різного хімічного складу. Розроблено рекомендації для режимів прискореного охолодження при термічній обробці залізничних коліс різного хімічного складу з урахуванням модернізації устаткування на термоділянці колесопрокатного цеху ПАТ «ІНТЕРПАЙП НТЗ», що дозволять підвищити рівномірність структури за перетином ободу і зменшити глибину утворення голчастих мікроструктур в процесі прискореного охолодження.

З переходом виробництва металопродукції залізничного призначення на використання безперервнолітої заготовки створилась необхідність всебічного дослідження металу після кристалізації та встановлення закономірностей спадкового впливу вихідної структури на кінцевий комплекс властивостей та структурний стан після деформаційної та термічної обробки сталі. Було проведено цикл досліджень, які дозволили розширити уявлення про спадковий зв'язок хімічної мікронеоднорідності з дендритною ліквідацією марганцю і кремнію в вуглецевій сталі і її вплив на особливості кінцевої структури елементів залізничних коліс, а також про природу їх утворення і трансформації в процесі деформаційно-термічної обробки [10].

Ще одним видом металопродукції залізничного призначення, підвищенням надійності і довговічності якого присвячені роботи ВКС ІЧМ НАН України є залізничні осі. Було досліджено особливості дендритної будови вихідної безперервнолітої заготовки $\varnothing$ 470 мм для виробництва залізничних осей та визначено ступінь деформаційної проробки металу по перерізу осьових заготовок $\varnothing$ 380 і 220 мм після прокатки на пільгерстанах в умовах ПАТ «ІНТЕРПАЙП НТЗ»; за допомогою методу оцінки деформованого стану металу за зміною щільності «слідів» дендритної структури визначено ступінь деформаційного пророблення металу по перерізу осьових заготовок. За результатами досліджень розроблено рекомендації щодо підвищення втомної міцності залізничних осей виробництва ПАТ «ІНТЕРПАЙП НТЗ». Досліджено вплив параметрів пластичної деформації на показники якості (макро- і мікроструктуру, механічні властивості) напівфабрикату і готової металопродукції. Встановлено, що:

– на мінімальний коефіцієнт витяжки, необхідний для стабілізації механічних властивостей по перерізу

прокату, основний вплив має початкова макроструктура безперервнолитої заготовки;

– мінімальний коефіцієнт витяжки, необхідний для стабілізації механічних властивостей, збільшується з ростом вмісту вуглецю та легуючих елементів в сталі (в першу чергу, це відноситься до показників пластичності та ударної в'язкості);

– на проробку литої структури впливає розмір безперервнолитої заготовки, причому, через два фактори – стан макроструктури та схему напружено-деформованого стану: чим менше переріз безперервнолитої заготовки (БЛЗ), тим дрібніша і рівномірніша лита структура і більш сприятлива схема напружено-деформованого стану центральної зони заготовки при прокатці.

Отримані результати стали основою при розробці та освоєнні енерго- та ресурсозберігаючої технології, яка виключає операцію кування, нового для ПАТ «ІНТЕРПАЙП НТЗ» виду продукції – важко навантажених залізничних осей.

В останні роки у ВКС ІЧМ НАН України виконуються дослідження, спрямовані на підвищення показників якості залізничних рейок [11]. Всебічно досліджено можливості відомих марок сталей для рейок залізничного призначення при принциповій зміні способу їх термічної обробки (рис. 5). Також проходять дослідження з розробки хімічного складу та режимів термічного зміцнення сталей для забезпечення в рейках значень показників якості на рівні кращих світових аналогів.

Крім того, у ВКС ІЧМ НАН України виконуються роботи з дослідження структурного стану, службових і експлуатаційних властивостей різних видів металопрокату (науково-технічний центр Інституту чорної металургії НАН України) за наступними напрямками:

– дослідження закономірностей структуроутворення при термічній і термомеханічній обробці різних видів металопрокату, проведення їх макро- і мікро-структурного аналізу;

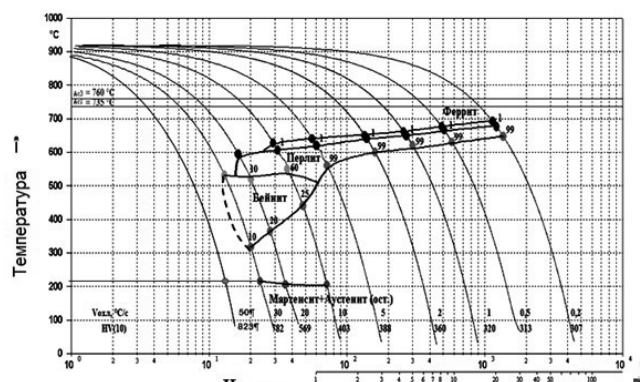


Рис. 5 Термокінетична діаграма розпаду переохолодженого аустеніту при безперервному охолодженні сталі з 0,80 % C; 0,25 % Si; 0,97 % Mn; 0,055 % V

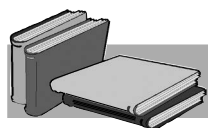
– дослідження механічних властивостей різних видів металопрокату при статичному, динамічному і циклічному навантаженні;

– розробка методик досліджень механічних властивостей і проведення натурних випробувань металопрокату і сталевих виробів різного призначення;

– метрологічний контроль випробувальних і вимірювальних засобів відділу і їх перевірка;

– проведення сертифікаційних і арбітражних випробувань за завданнями підприємств і організацій України.

Розробки відділу конструкційних сталей з підвищення надійності та довговічності металопродукції для залізничного транспорту знаходяться на рівні кращих світових аналогів. Завдяки успішному поєднанню високого рівня фундаментальних та прикладних досліджень майже всі вони впроваджуються на металургійних підприємствах. Загальний економічний ефект від впровадження результатів досліджень ВКС тільки в умовах ПАТ «ІНТЕРПАЙП НТЗ» за останні три роки (2016–2018 рр.) склав близько 7 млн грн.

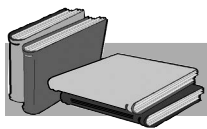


ЛИТЕРАТУРА

1. Інститут черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины / Под ред. В.И. Большакова. Днепропетровск: АРТ-ПРЕСС, 2007. 448 с.
2. Большаков В.И., Узлов О.В., Пучиков А.В. Особенности получения структуры игольчатого феррита в низколегированных конструкционных сталях. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2005. № 1. С. 63–65.
3. Babachenko A.I., Togobitskaya D.N., Kozachyok A.S., Kononenko A.A., Knysh A.V., Snigur I.R. Optimization of chemical composition of steel for railroad wheels providing stabilization of mechanical and increase of operational properties. *Metallurgical and Mining Industry*. 2017. № 3. P. 32–39.
4. Узлов И.Г., Узлов К.И., Бабаченко А.И., Хулин А.Н., Кононенко А.А. Опыт-промышленная реализация технологии производства высокопрочных локомотивных бандажей повышенной износостойкости. *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: Сб. науч. тр.* Днепропетровск.: ІЧМ НАН України, 2009. Вип. 19. С. 255–264.
5. Бабаченко А.И., Кононенко А.А., Кныш А.В., Дементьева Ж.А., Шпак Е.А., Клиновья О.Ф. Влияние температуры испытаний на механические свойства стали для железнодорожных колес с новой системой легирования. *Строительство, материаловедение, машиностроение: Сб. науч. трудов*. Дн-ск: ГВУЗ «ПГАСА», 2016. Вип. 78. С. 102–108.
6. Бабаченко А.И., Кононенко А.А., Филиппов А.А. Разработка химического состава стали для железнодорожных колес, обеспечивающего повышение их ресурса в различных условиях эксплуатации. Материалы 78 Международной научно-практической конференции «Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта» (17–18 мая 2018, г. Днепр). Днепр, 2018. С. 284–286.

7. Babachenko A.I., Demina K.G., Kononenko G.A., Khulin A.N., Golovko O.N., Ashkelianets A.V. The influence of initial blank parameters on railway wheels manufacture with hot plastic deformation process. *Metallurgical and Mining Industry. Ukraine*. 2017. № 6. P. 25–33.
8. Борисенко А.Ю., Кононенко А.А., Бабаченко А.И., Науменко Л.Д. Микроструктурные исследования формирования первичного зерна аустенита после кристаллизации углеродистых сталей с 0,5–0,7 % С. *Доповіді НАН України*. 2010. № 9. С. 70–77.
9. Бабаченко О.І., Кононенко Г.А., Хулін А.М. Моделювання методом кінцевих елементів зміни температури за перетином обода в процесі термічної обробки залізничних коліс зі сталей різного хімічного складу. *Металознавство та термічна обробка металів*. 2018. № 1. 2018. С. 10–17.
10. Бабаченко О.І., Дьоміна К.Г., Книш А.В. та ін. Вплив режиму охолодження та хімічного складу на формування дендритної структури злитка та безперервнолитих заготовок. *Металознавство та обробка металів*. 2015. № 2. С. 16–24.
11. Бабаченко О.І., Кононенко Г.А., Філоненко Н.Ю., Хулін А.М. Розробка математичної моделі розрахунку теплового поля за перетином залізничної рейки при термічній обробці. *Сборник научных трудов «Строительство, материаловедение, машиностроение»*. 2018. № 104. С. 31–35.

Поступила 27.09.2019



REFERENCES

1. Bolshakov, V.I. (Ed.) (2007). Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov of the NAS of Ukraine. Dnepropetrovsk: ARTPRESS, 448 p. [in Russian].
2. Bolshakov, V.I., Uzlov, O.V., Puchikov, A.V. (2005). Features of obtaining the needle ferrite structure in lowalloy structural steels. *Metallurgical and Mining Industry*, no. 1, pp. 63–65 [in Russian].
3. Babachenko, A.I., Togobitskaya, D.N., Kozachyok, A.S., Kononenko, A.A., Knysh, A.V., Snigur, I.R. (2017). Optimization of chemical composition of steel for railroad wheels providing stabilization of mechanical and increase of operational properties. *Metallurgical and Mining Industry*, no. 3, pp. 32–39 [in English].
4. Uzlov, I.G., Uzlov, K.I., Babachenko, A.I., Khulin, A.N., Kononenko, A.A. (2009). Experimental and industrial implementation of the technology of production of high-strength locomotive bandages with high wear resistance. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy: Collection of scientific works*. Dnepropetrovsk: ISI NAS of Ukraine, iss. 19, pp. 255–264 [in Russian].
5. Babachenko, A.I., Kononenko, A.A., Knysh, A.V., Dementieva, J.A., Shpak, E.A., Klinovaya, O.F. (2016). Influence of test temperature on mechanical properties of steel for railway wheels with a new alloying system. *Construction, material science, mechanical engineering: Collection of scientific works*, Dn-sk: Higher School of Public Administration "PSASA", iss. 78, pp. 102–108 [in Russian].
6. Babachenko, A.I., Kononenko, A.A., Filippov, A.A. (2018). Development of the chemical composition of steel for railway wheels, providing increase of their resource in different operating conditions. *Proceedings of the 78th International Scientific and Practical Conference "Problems and Prospects for the Development of Railway Transport" (17–18 of May, 2018, Dnipro)*. Dnipro, pp. 284–286 [in Russian].
7. Babachenko, A.I., Demina, K.G., Kononenko, A.A., Khulin, A.N., Golovko, O.N., Ashkelianets, A.V. (2017). Influence of initial blank parameters on railway wheels production with hot plastic deformation process. *Metallurgical and Mining Industry. Ukraine*, no. 6, pp. 25–33 [in English].
8. Borisenko, A.Yu., Kononenko, A.A., Babachenko, A.I., Naumenko, L.D. (2010). Microstructural studies of the formation of primary austenite grain after crystallization of carbon steels with 0.5–0.7 % C. *Reports of the NAS of Ukraine*, no. 9, pp. 70–77 [in Russian].
9. Babachenko, O.I., Kononenko, G.A., Khulin, A.M. (2018). Finite element simulation of temperature change at the intersection of the rim in the process of heat treatment of railway wheels from steels of different chemical composition. *Metal science and heat treatment of metals*, no. 1, pp. 10–17 [in Ukrainian].
10. Babachenko, O.I., Demina, K.G., Knysh, A.V. et al. (2015). Influence of cooling mode and chemical composition on the formation of dendritic ingot structure and continuous casting blanks. *Metal science and metal processing*, no. 2, pp. 16–24 [in Ukrainian].
11. Babachenko, O.I., Kononenko, G.A., Filonenko, N.Yu., Khulin, A.M. (2018). Development of a mathematical model for the calculation of the thermal field at the intersection of the rail during heat treatment. *Collection of scientific works "Construction, material science, mechanical engineering"*, no. 104, pp. 31–35 [in Ukrainian].

Received 27.09.2019

Аннотация

А.И. Бабаченко, д-р техн. наук, ст. науч. сотр., директор, e-mail: a_babachenko@i.ua, <https://orcid.org/0000-0003-4710-0343>;
А.А. Кононенко, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., e-mail: perlit@ua.fm, <https://orcid.org/0000-0001-7446-4105>; **К.Г. Демина**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., e-mail: katya20@ua.fm, <https://orcid.org/0000-0001-9668-8169>

*Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины
(Днепр, Украина)*

Разработка химического состава и совершенствования технологии производства для повышения эксплуатационной надежности и долговечности железнодорожной металлопродукции

Развитие теоретических основ и практические разработки параметров процесса и оборудования для термической обработки проката в процессе его массового производства – основное направление работы отдела проблем деформационно-термической обработки конструкционных сталей. Отдел под руководством К.Ф. Стародубова был основан в Институте черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины, который определен как головная организация по производству и качеству металлопродукции для железнодорожного транспорта. За последние годы отделом разработаны новые стали для элементов грузовых вагонов нового поколения и технологический процесс их термической обработки, обеспечивающей возможность производства высокопрочного хладостойкого проката без использования дорогостоящих легирующих элементов. Для железнодорожных колес разработаны стали с различными системами легирования для различных условий эксплуатации. Разработанные параметры термической обработки позволяют достичь заданного комплекса свойств. Научно обосновано и подтверждено позитивное влияние повышения степени деформации в центральных объемах металла обода на вязкость разрушения K_{Ic} . Создана модель расчета температурных полей в процессе ускоренного охлаждения обода железнодорожного колеса. Для образования однородной структуры по сечению железнодорожных колес обоснованы рациональные режимы термического упрочнения в зависимости от химического состава стали. С помощью метода оценки деформированного состояния металла исследованы особенности дендритного строения исходной непрерывнолитой заготовки Ø 470 мм для производства железнодорожных осей и осевых заготовок Ø 380 и 220 мм в условиях ОАО «ИНТЕРПАЙП НТЗ». Определена степень деформационной проработки металла по сечению осевых заготовок и разработаны рекомендации по повышению усталостной прочности железнодорожных осей производства ОАО «ИНТЕРПАЙП НТЗ». В последние годы ведутся работы по совершенствованию химического состава и технологии термической обработки железнодорожных рельсов отечественного производства.

Ключевые слова

Термическая обработка проката, массовое производство, новые стали, железнодорожные колеса, железнодорожные оси, железнодорожные рельсы.

Summary

A.I. Babachenko, Dr. Sci. (Engin.), Senior Research Scientist, Director, e-mail: a_babachenko@i.ua, <https://orcid.org/0000-0003-4710-0343>;
A.A. Kononenko, PhD (Engin.), Senior Researcher, e-mail: perlit@ua.fm, <https://orcid.org/0000-0001-7446-4105>; **K.G. Demina**, PhD (Engin.), Senior Researcher, e-mail: katya20@ua.fm, <https://orcid.org/0000-0001-9668-8169>

Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov of the NAS of Ukraine (Dnipro, Ukraine)

Development of chemical composition and improvement of production technology to improve operational reliability and durability of rail metal products

The development of theoretical foundations and practical development of process parameters and equipment for heat treatment of rolled products in the process of mass production is the main area of work of the department of problems of deformation-heat treatment of structural steels. Division under the direction of K.F. Starodubov was founded at the Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov of the NAS of Ukraine, defined as the leading organization for the production and quality of

metal products for rail transport. In recent years, the department has developed new steels for the elements of freight cars of a new generation and the technological process of their heat treatment, which provides the possibility of producing high-strength cold-resistant steel without the use of expensive alloying elements. Steel wheels with various alloying systems for various operating conditions have been developed for railway wheels. The developed heat treatment parameters make it possible to achieve a given set of properties. The positive effect of increasing the degree of deformation in the central volumes of the rim metal on the fracture toughness K_{Is} has been scientifically substantiated and confirmed. A model for calculating temperature fields in the process of accelerated cooling of a rim of a railway wheel has been created. For the formation of a homogeneous structure along the crosssection of railway wheels, rational regimes of thermal hardening depending on the chemical composition of steel are justified. Using the method of assessing the deformed state of the metal, the features of the dendritic structure of the initial continuously cast billet Ø 470 mm for the production of railway axles and axial billets Ø 380 and 220 mm in the conditions of OJSSC "INTERPIPE NTZ" were investigated. The degree of deformation study of metal over the cross section of axial billets was determined and recommendations were developed to increase the fatigue strength of railway axles manufactured by OSSC "INTERPIPE NTZ". In recent years, work is underway to improve the chemical composition and heat treatment technology of domesticmade railway rails.

Keywords

Heat treatment of rolled products, mass production, new steels, railway wheels, railway axles, railway rails.

И.Г. Муравьева, д-р техн. наук, ст. науч. сотр., зав. отделом, e-mail: irinamuravyova@gmail.com

Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины (Днепр, Украина)

Комплексные исследования технологий, оборудования и систем автоматизации металлургического производства

Показаны основные этапы формирования тематики исследований отдела технологического оборудования и систем управления. Выполнен анализ результатов научной деятельности трех подразделений отдела. Представлены основные разработки группы машин доменного производства, к числу которых можно отнести: технологию загрузки многокомпонентной шихты; комплексную математическую модель формирования многокомпонентных порций шихтовых материалов, их загрузки в бункер бесконусного загрузочного устройства (БЗУ), выгрузки из бункера и распределения на поверхности засыпи; интеллектуальную систему поддержки принятия решений по управлению доменной плавкой; новые способы контроля и управления доменной плавкой с использованием информации современных систем автоматизированного контроля. Показаны основные направления сотрудничества с металлургическими предприятиями отрасли. Представлены основные направления исследований группы разработки технологий и оборудования для подготовки шихтовых материалов, охватывающие теоретические и экспериментальные исследования влияния физико-механических и технологических характеристик мелкофракционных шихтовых материалов на процесс прессования, качество брикетов и их металлургические свойства, а также создания технических решений механического оборудования для брикетирования. Представлены результаты исследований и разработки новых способов диагностирования, совершенствования режимов работы станов совместно с особенностями технологий, методов оценки стабильности работы оборудования и технологического процесса, которые выполняют сотрудники группы динамики прокатного оборудования.

Ключевые слова: способы контроля и управления доменной плавкой, технология загрузки, многокомпонентная шихта, комплексная модель распределения шихты на колошнике, технологии и оборудование для брикетирования, динамика прокатного оборудования.

В 1954 г. распоряжением Президиума АН УССР в Институте черной металлургии (ИЧМ) был создан отдел механизации и автоматизации металлургического производства, впоследствии – отдел технологического оборудования и систем управления (ОТОСУ) [1]. Возглавил его член-корреспондент НАН Украины Сергей Николаевич Кожевников – ученый-механик с мировым уровнем признания, создавший известную школу основ динамики металлургических машин. В течение многих лет деятельности отдела учениками Сергея Николаевича под его непосредственным руководством, а затем под руководством его преемников, руководителей отдела, д.т.н., профессоров А.В. Праздникова и О.Н. Кукушкина, академика НАН Украины В.И. Большакова выполнялись научные исследования динамических процессов в линиях приводов металлургического оборудования, прокатных станов практически всех типов, начиная с обжимных, заготовочных и заканчивая станами для производства листа, труб, сортового проката и катанки. Отдел выполнял также работы в области автоматизации металлургического производства.

Ввод новых металлургических агрегатов значительно расширил рамки научной деятельности ОТОСУ. Завершение строительства крупнейшей в мире доменной печи объемом 5000 м³ на меткомбинате «Криворожсталь» в 1974 г. обусловило активное участие сотрудников отдела в освоении этой печи, в процессе которого сформировалось новое научное направление – создание теоретических основ разработки и совершенствования технологии, оборудования и автоматизации комплексов систем загрузки доменных печей большого объема [1, 2].

Еще одно новое направление научных исследований отдела возникло в 80-х годах прошлого столетия на основе результатов цикла ранее выполненных под руководством академика НАН Украины З.И. Некрасова работ по разработке и освоению технологии производства вюститных брикетов для доменных печей. Впоследствии это направление возглавил д.т.н. Носков В.А. Таким образом, последовательно была сформирована научная направленность исследований отдела технологического оборудования и систем управления.

На протяжении более чем четырех десятков лет, под руководством академика НАН Украины Вадима Ивановича Большакова разработаны и реализованы новые способы и приемы контроля и управления процессом доменной плавки, выбора рациональных технологических режимов и режимов работы оборудования, а также выполнены разработки, направленные на повышение интеллектуального потенциала и совершенствование алгоритмов функционирования автоматизированных систем управления технологическим процессом [2]. Особенностью выполненных исследований всегда являлась комплексность решения задач разработки и совершенствования технологии во взаимосвязи с работой оборудования и систем автоматизированного контроля и управления.

Традиционные направления работы отдела, такие как разработка технологических заданий (ТЗ) на проектирование систем загрузки при строительстве и реконструкции доменных печей (ДП), а также технологических требований к системам управления загрузкой с учетом сырьевых условий и особенностей технологии плавки [2]; технологическое сопровождение задувки и раздувки доменных печей, включающее расчет задувочной шихты и разработку программы ее загрузки, контроль загрузки задувочной шихты, проведение предпусковых исследований, технологическую наладку оборудования системы загрузки для обеспечения реализации заданных режимов ее работы, корректировку шлакового и дутьевого режимов, а также режима загрузки в период раздувки [3] в последние годы дополнились разработкой и совершенствованием технологии загрузки многокомпонентной шихты. Решение задач, связанных с рациональным использованием топливных, железосодержащих, флюсующих, гарнисажеобразующих и промывочных добавок, особенно актуально в настоящее время.

В течение последних 10 лет ОТОСУ совместно с отделом металлургии чугуна разработана технология загрузки многокомпонентной шихты, основные положения которой сформулированы с.н.с. Н.Г. Иванчой [4]. Составляющими этой технологии являются научно обоснованные и реализующие технологические требования приемы формирования и загрузки: железорудных смешанных порций; коксовых смешанных порций при использовании различных видов кокса в шихте; смешанных порций, содержащих добавки различного назначения; многокомпонентных смешанных порций, состоящих из железорудных материалов и кокса. Положения технологии, касающиеся формирования и загрузки железорудных смешанных порций, включают рациональные структуры этих порций и метод расчетного определения параметров их формирования, в том числе массы головной части из агломерата, обеспечивающей минимизацию содержания окатышей в пристеночной зоне, что способствует уменьшению агрессивного воздействия первичных шлаковых расплавов на огнеупорную футеровку шахты, а также препятствует износу холодильников и прогару воздушных фурм. Для загрузки доменных печей при использовании в шихте двух и более видов кокса разработаны новые технологиче-

ские приемы и параметры формирования коксовых смешанных порций, обеспечивающие стабилизацию процесса плавки за счет распределения кокса пониженного качества в промежуточной зоне колошника с максимальной его концентрацией в области фурменного очага. В части формирования и загрузки смешанных порций, включающих добавки различного назначения, разработанная технология предусматривает выбор требуемого характера распределения конкретного вида добавок в соответствии с разработанными технологическими требованиями, расчетную оценку распределения добавок в текущих условиях и выбор рациональных параметров формирования смешанных порций, в состав которых включен данный вид добавок, с определением величины управляющего воздействия, влияющего на характер распределения.

Разработанная технология содержит также рекомендуемую структуру многокомпонентных смешанных порций, состоящих из агломерата, окатышей и кокса, рациональные диапазоны параметров формирования порций этого вида и периодичность их загрузки в составе цикла, обеспечивающие стабильное использование преимуществ смешивания железорудных материалов с коксом перед загрузкой в доменную печь, проявляющихся в уменьшении удельного расхода кокса и возможности использования увеличенного количества шихтовых материалов пониженного качества без существенного ухудшения показателей плавки.

Разработанная технология загрузки многокомпонентной шихты реализована на многих доменных печах Украины и стран бывшего СССР.

Основным инструментарием при разработке технологии загрузки доменных печей многокомпонентной шихтой явилась не имеющая мировых аналогов созданная сотрудниками отдела комплексная математическая модель формирования многокомпонентных порций шихтовых материалов, их загрузки в бункер БЗУ, выгрузки из бункера и распределения на поверхности засыпи [4] (основные разработчики – с.н.с. Иванча Н.Г., н.с. Вишняков В.И., к.т.н., с.н.с. Шумельчик Е.И.). Модель обеспечивает определение текущего компонентного состава потока, формирующегося при выгрузке многокомпонентных порций из бункера БЗУ, и полного состава смесей компонентов шихты в различных кольцевых зонах колошника. Математическое и алгоритмическое обеспечение модели разработано на основе установленных фундаментальных зависимостей истечения шихтовых материалов из бункеров, а также результатов многочисленных экспериментальных исследований, выполненных ИЧМ на объектах доменного производства в промышленных условиях.

В модели учтено влияние комплекса процессов перемещения массивов шихтовых материалов и смешивания компонентов в процессе движения многокомпонентных порций шихты, начиная со стадии выгрузки их на доменный конвейер или загрузки в скипы до выгрузки в колошниковом пространстве, на формирование характеристик распределения

компонентов шихты на поверхности засыпи. Расчетный состав смеси компонентов шихты в заданной зоне колошника является исходной информацией для получения прогнозной оценки свойств образующихся расплавов (содержание FeO, вязкость и др.). Сопоставление прогнозных свойств расплавов с характеристиками, заданными технологическими требованиями, позволяет выполнить оценку эффективности применяемых режимов загрузки и шлакового режима и обоснованно принимать оперативные управляющие решения по корректировке их параметров.

Фрагмент интерфейса комплексной математической модели формирования многокомпонентных порций шихтовых материалов, их загрузки в бункер БЗУ, выгрузки из бункера и распределения на поверхности засыпи показан на рис. 1.

Одним из направлений научной деятельности отдела является разработка систем управления. Сотрудниками отдела – к.т.н., с.н.с. Семеновым Ю.С., к.т.н. Шумельчиком Е.И., с.н.с. Иванчой Н.Г., м.н.с. Белошапкой Е.А. – совместно с коллегами из отдела физико-химических проблем металлургических процессов (зав. отделом, д.т.н., проф. Тогобицкая Д.Н.) под руководством автора статьи разработана интеллектуальная система поддержки принятия решений по управлению доменной плавкой, сочетающая методы, базирующиеся на знаниях специалистов-экспертов и накопленном опыте, с предложенными методами математической оценки процессов на основе целевых критериев и алгоритмами их использования при поиске и формулировании решений по управлению процессом [5]. В комплексных критериях объединены технологические параметры и выходные данные систем автоматизированного контроля процессов, что в значительной степени облегчит принятие операторами решений по управлению доменной плавкой. Диагностика процесса плавки осуществляется на основе расчета следующих критериев оценки: теплового состояния доменной плавки, газодинамического режима, формы и положения пластичной зоны, эффективности осевой коксовой отдушины, воздействия расплавов на футеровку металлоприемника и интегрального показателя доменной шихты.

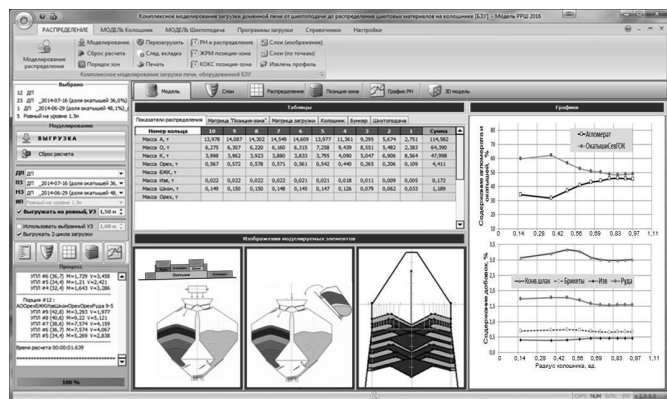


Рис. 1. Фрагмент интерфейса комплексной математической модели формирования многокомпонентных порций шихтовых материалов, их загрузки в бункер БЗУ, выгрузки из бункера и распределения на поверхности засыпи

Фрагмент интерфейса интеллектуальной системы поддержки принятия решений по управлению доменной плавкой показан на рис. 2.

В настоящее время сотрудниками отдела разрабатывается экспертная система выбора оптимального состава многокомпонентной доменной шихты. Известные методы решения задачи выбора состава шихты, как правило, основываются на прогнозном определении показателей плавки при варьировании компонентного состава шихтовых материалов с использованием расчетов материально-тепловых балансов процесса плавки. Важной особенностью разрабатываемой системы является повышение точности решения оптимизационной задачи выбора состава многокомпонентной шихты путем ввода дополнительных технологических ограничений, обусловленных специфическими свойствами расплавов отдельных компонентов шихты и их смесей.

Известные и используемые в настоящее время методы оптимизации состава доменной шихты не учитывают неравномерность распределения ее компонентного состава и, соответственно, особенности процессов нагрева и восстановления шихтовых материалов, и специфику свойств расплавов, образующихся в различных зонах рабочего пространства доменной печи, что существенно снижает достоверность балансовых и оптимизационных расчетов. Кроме этого, особенности распределения компонентов шихты в объеме доменной печи налагают ряд технологических ограничений по использованию конкретных видов материалов в составе шихты, которые обусловлены специфическими свойствами расплавов этих материалов – их агрессивностью по отношению к футеровке или повышенной вязкостью.

Начиная с 2001 г. в отделе под руководством автора статьи выполняются исследования, направленные на разработку новых способов контроля и управления доменной плавкой с использованием информации современных систем автоматизированного контроля (отв. исп., к.т.н., с.н.с. Семенов Ю.С.). В результате этих исследований выполнен цикл работ, позволивший разработать технологические требования к установке систем измерения профиля поверхности засыпи для доменных печей средних и больших объ-

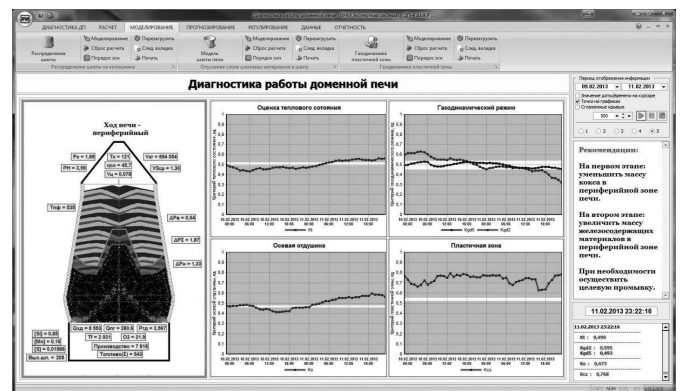


Рис. 2. Фрагмент интерфейса интеллектуальной системы поддержки принятия решений по управлению доменной плавкой

емов, оборудованных конусными и бесконусными загрузочными устройствами, а также методы расчета параметров поверхности засыпи шихты. С использованием информации первой отечественной радиолокационной системы разработаны способы контроля, прогноза и управления доменной плавкой, реализованные на крупнейшей в Украине ДП № 9 Криворожстали. Результаты исследований, выполненных в этом направлении, явились базой для дальнейшей разработки новых технологических способов управления доменной плавкой на основе информации, получаемой современными средствами контроля [6].

К числу успешных разработок последних лет можно отнести экспертный модуль системы контроля температур газового потока (системы термозондов) над поверхностью шихты в доменной печи, выходной информацией которого являются рекомендации по корректировке программ загрузки шихты (к.т.н., с.н.с. Семенов Ю.С. и к.т.н. Шумельчик Е.И.) [7, 8]. По результатам комплекса исследований, выполненных на доменных печах Енакиевского металлургического завода (ЕМЗ) с использованием стационарных термозондов, контролирующих распределение температур газового потока над поверхностью засыпи шихты, установлено, что в условиях постоянного распределения шихтовых материалов по радиусу при переменном содержании в шихте окатышей (20–70 %) и, соответственно, горячего агломерата, характер распределения температур газа по радиусу печи остается практически одинаковым, пропорционально изменяются только абсолютные значения температур при соответствующем изменении в шихте количества горячего агломерата (рис. 3) [7, 9]. Это свидетельствует о том, что информация, получаемая при помощи термозондов, может использоваться для принятия обоснованных управляющих воздействий независимо от соотношения в шихте компонентов, имеющих различную температуру [9].

Для двух доменных печей ЕМЗ, оборудованных конусным (КЗУ) (ДП № 5) и бесконусным (ДП № 3) загрузочными устройствами, предложены четыре температурных показателя оценки распределения газового потока по радиусу печи, характеризующие развитие периферийного, центрального распределения

газового потока, газопроницаемость промежуточной зоны и величину осевой коксовой отдушины. Установлены оптимальные диапазоны изменения этих показателей при работе доменных печей в различных газодинамических и топливных условиях, в том числе, при вдувании пылеугольного топлива (ПУТ) до 130 кг/т чугуна. Экспертный модуль системы контроля температур газового потока (системы термозондов) над поверхностью шихты в доменной печи, генерирующий корректирующие воздействия режима загрузки при выходе показателей распределения температур за оптимальный диапазон их изменения, впервые разработан для указанных доменных печей и прошел опытно-промышленное опробование на этих объектах (рис. 4) [7, 8].

Для исследований, выполняемых ОТОСУ, всегда было характерно тесное сотрудничество с металлургическими предприятиями. Эта практика сохранена и сегодня. В течение шести лет (в период с 2011 по 2016 г.) специалисты отдела тесно сотрудничали с Енакиевским металлургическим заводом (руководитель к.т.н., с.н.с. Семенов Ю.С., отв. исп., к.т.н. Шумельчик Е.И.). За этот период специалистами ОТОСУ совместно с ОМЧ (отдел металлургии чугуна: зав. ОМЧ, к.т.н. Нестеров А.С., н.с. Горупаха В.В.) был выполнен комплекс научно-исследовательских работ, в рамках которых были получены как новые научные результаты, так и практические, получившие последующее эффективное применение в производстве.

Перед задувкой ДП № 3 полезным объемом 1719 м³ после ее реконструкции в октябре 2011 г. были выполнены исследования параметров потоков шихтовых материалов, загружаемых в печь с помощью лоткового однострактного бесконусного загрузочного устройства фирмы "Paul Wurth", распределе-

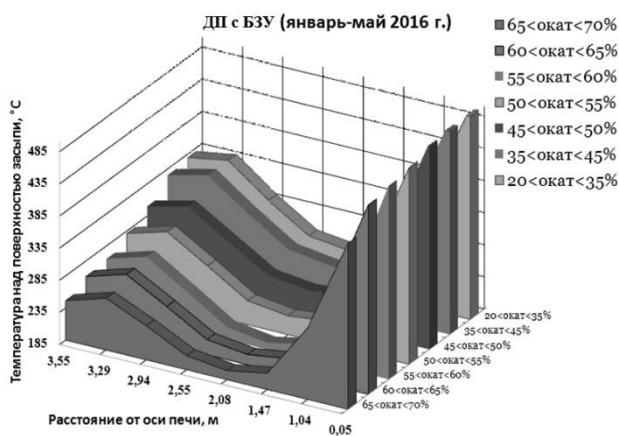


Рис. 3. Распределение температур газового потока над поверхностью засыпи ДП с БЗУ при различной доле в шихте окатышей

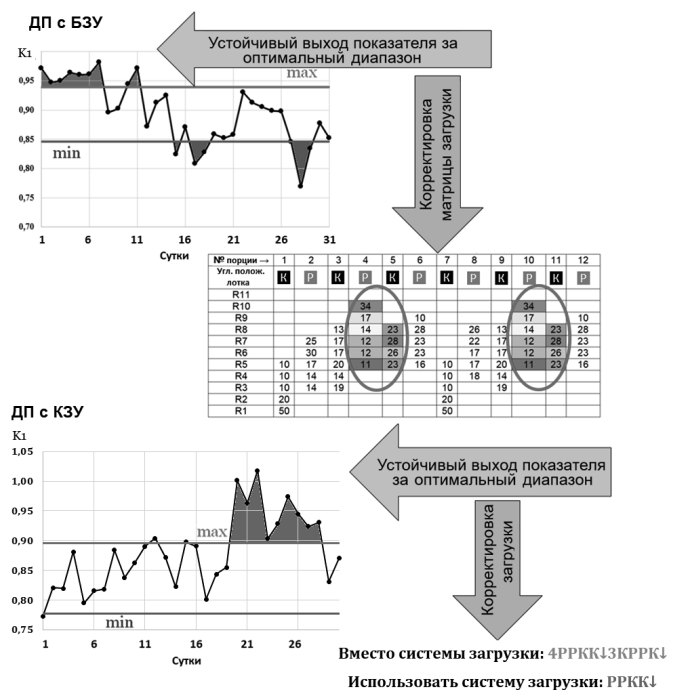


Рис. 4. Видеокдры экспертного модуля по управлению загрузкой ДП с БЗУ и с КЗУ

ния массы порций и их компонентов на колошнике, определены расходные характеристики шихтового затвора бункера БЗУ, а также выполнены исследования формирования профиля поверхности засыпки шихты, гранулометрического и компонентного составов слоя железосодержащих материалов по радиусу колошника [3].

Выполненный комплекс исследований позволил после задувки печи определить и реализовать режимы работы механизмов БЗУ, необходимые для эффективного применения рациональных программ загрузки печи [3, 7]. Помимо этого, для доменной цеха была разработана технологическая инструкция по эксплуатации БЗУ, которая устанавливает единый порядок эксплуатации и обслуживания оборудования БЗУ ДП № 3, а также порядок реализации технологических приемов управления ходом доменной плавки (н.с. Вишняков В.И.).

В 2013 г. при значительном ухудшении качества используемых шихтовых материалов разработан и реализован новый подход к выбору энергоэффективных режимов загрузки БЗУ, обеспечивающий стабильный экономичный ход доменной печи при использовании многокомпонентной шихты переменного качества в переходных дутьевых режимах и в условиях использования ПУТ. Подход заключается в уменьшении количества рабочих угловых положений лотка и смещении максимумов рудных нагрузок вдоль радиуса колошника от порции к порции, что способствует повышению газопроницаемости и увеличению степени использования восстановительной способности газов за счет увеличения времени пребывания газов в печи (рис. 5). Приведенный к сопоставимым условиям удельный расход кокса после изменения программы загрузки уменьшился на 2 % [7, 10].

Значительный комплекс исследований, выполненных на доменных печах ЕМЗ, был посвящен анализу динамики изменения температур футе-

ровки запечников, распара и шахты ДП № 3 и температур тела холодильных плит по высоте ДП № 5 [7, 11]. Установлено, что на температуры футеровки верхней зоны в большей степени влияет степень ее износа, на температуры футеровки нижней зоны – формирование стабильного гарнисажа. Определены предельные значения среднемесячных температур, которые свидетельствуют о частичном или полном износе футеровки шахты, а также предельные значения температур нижней зоны печи, характеризующие наличие устойчивого гарнисажа [7, 11]. Температура футеровки шахты при практически полном ее износе была идентифицирована, как температура периферийного газового потока, и анализ ее изменения с определением экстремумов в нижней части шахты был выполнен при работе доменной печи в различных газодинамических и топливных условиях: без топливных добавок в дутье с дополнительным его увлажнением, с природным газом (ПГ), с ПГ и ПУТ, с ПУТ. Определение экстремумов кривой изменения температуры периферийного газового потока в нижней части доменной печи позволили обосновать принятые допущения о положении корня зоны вязкопластичного состояния [7].

Разработан и опробован метод выбора расположения закрытых воздушных фурм или фурм разного диаметра с использованием информации об изменении температур футеровки по высоте и окружности доменной печи. При использовании метода, в результате изменения положения закрытых фурм уменьшились как окружная неравномерность температур футеровки, так и средние значения температур, что обусловлено перераспределением газового потока, которое, кроме того, способствовало уменьшению удельного расхода кокса на 1,7 % [7].

Установлено, что изменения температуры тела холодильных плит ДП № 5 свидетельствуют об изменении направления движения газового потока в столбе шихты по радиусу и окружности печи при существенных отклонениях в процессе плавки и при изменении сопротивления столба шихтовых материалов. Увеличению местных тепловых нагрузок на систему охлаждения способствуют также повышение уровня тепло-газодинамических параметров дутья и интенсивности процесса плавки, увеличение рудной нагрузки при замене кокса ПУТ. Для уменьшения влияния этих факторов необходимо применять меры, направленные на развитие и поддержание центрального газового потока в печи, а также избегать резкого повышения теплоэнергетических параметров дутья. При условии удовлетворительной газо- и гидропроницаемой способности коксовой насадки низа печи, за счет перераспределения газового потока в центральную зону печи, температуры холодильных плит уменьшаются до обычного рабочего уровня, расход ПУТ при этом должен быть ограничен качеством его сжигания в пределах окислительной зоны для предотвращения замусоренности промежуточных шлаков частицами ПУТ [7].

Освоение технологии вдувания ПУТ в доменном цехе ЕМЗ в 2016 г. в переменных шихтовых

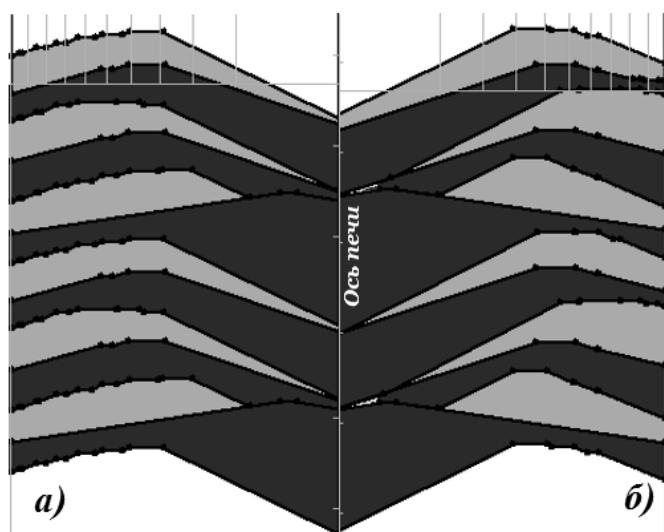


Рис. 5. Структура столба шихты при традиционном распределении шихтовых материалов (а) и при применении нового подхода (б)

условиях и с работой на коксе пониженного качества при использовании разработанных ИЧМ рациональных режимов загрузки, формирования порций и выборе рационального шлакового режима позволили довести расход ПУТ, в среднем, до 130 кг/т чугуна. Оперативный контроль состояния футеровки шахт доменных печей по показаниям термопар футеровки, тела холодильников и тепловых нагрузок системы охлаждения позволил своевременно проводить гарнизажеобразующие мероприятия и корректировать распределение компонентов шихтовых материалов по радиусу и окружности печи. Реализация предложенных изменений программы загрузки и режима формирования порций позволила при работе ДП № 3 без футеровки на начальном этапе освоения ПУТ снизить температуры периферийного газового потока по всей высоте печи, в среднем, на 13 % и уменьшить окружную неравномерность температур на 11 %. Использование в технологии рациональных режимов загрузки при вдувании ПУТ позволило до шоткретирования обеспечить эксплуатационную стойкость системы охлаждения и безаварийную работу доменных печей [7].

Сотрудничество ИЧМ с Днепровским металлургическим комбинатом (ДМК) в области доменного производства началось с октября 2017 г. в период задувки трех доменных печей цеха после их длительного простоя, вызванного отсутствием сырья в результате утраты контроля над рядом предприятий горно-металлургического комплекса (ГМК) Донбасса (руководитель к.т.н., с.н.с. Семенов Ю.С., отв. исп., н.с. ОМЧ В.В. Горупаха и с.н.с., к.т.н. ОТОСУ Шумельчик Е.И.).

В условиях доменного цеха ДМК впервые в Украине разработан и внедрен комплекс мероприятий по обеспечению рационального распределения ПУТ по воздушным фурмам. Исследования значений теплосъемов и распределения расхода дутья позволили оценить окружное распределение теоретической температуры горения и для ее выравнивания реализовать направленную неравномерность расхода ПУТ. Эффективность опытно-промышленного внедрения направленной неравномерности расхода ПУТ по окружности доменной печи с целью создания равномерного окружного распределения теоретической температуры горения выразилась в снижении приведенного расхода кокса на 4,7 % в опытном периоде при уменьшении на 12 % колеблемости содержания кремния в чугуне на выпуске. Для эффективного контроля распределения дутья по воздушным фурмам доменной печи и последующего изменения распределения ПУТ по окружности печи с целью выравнивания или создания заданной неравномерности теоретической температуры горения рекомендовано внедрение системы автоматизированного контроля, которая включает установку на каждый фурменный прибор расходомера воды, поступающей на охлаждаемые элементы фланцев подвешенного (подвижного) колена фурменного прибора, термопары на участке сливного трубопровода после охлаждения и подсистемы визуализации информации изменения теплосъемов, расходов пылеугольного топлива, фак-

тической и рекомендуемой теоретической температуры горения.

Для ДП № 9 ДМК, оборудованной конусным загрузочным устройством, установлены оптимальные диапазоны изменения температурных показателей оценки распределения газового потока по радиусу при вдувании ПУТ от 130 до 160 кг/т чугуна [7, 8]. Разработан и прошел опытно-промышленное опробование экспертный модуль системы термозондов (по аналогии с реализацией экспертного модуля на доменных печах ЕМЗ), генерирующий корректирующие воздействия режима загрузки.

На доменных печах ЕМЗ с 2013 г. и ДМК с 2019 г. отработана технология использования в составе доменной шихты марганецсодержащих материалов (брикетов и подготовленного концентрата), что при рациональном формировании подач в цикле загрузки позволило усилить промывочный эффект этих компонентов и способствовало поддержанию технологической устойчивости работы печей в условиях низкого и нестабильного качества шихтовых материалов и при вдувании большого количества ПУТ, а также расширило возможности применения технологических приемов и мероприятий для снижения расхода кокса, например, ввода в шихту отсеваемых фракций кокса в количестве 25–45 кг/т чугуна. Установлено, что с вводом в шихту марганца снижается колеблемость теплового состояния, выраженная в уменьшении среднеквадратичного отклонения кремния в чугуне, увеличивается производство чугуна на 4 %, уменьшается расход кокса на 1,5 %. При производстве передельного чугуна рациональным диапазоном содержания марганца в чугуне является 0,25–0,35 %.

Отдельно следует отметить, что в 2018 г. начато новое направление исследований ИЧМ – освоение технологии вдувания ПУТ во вращающиеся печи обжига извести. Под руководством к.т.н., с.н.с. Семенова Ю.С. совместно с н.с. ОМЧ Горупахой В.В. и с.н.с., к.т.н. ОТОСУ Шумельчиком Е.И. разработан и опробован в автоматизированных системах управления (АСУ) метод диагностики работоспособности механизмов установки вдувания ПУТ в конвертерном цехе ДМК, который позволяет формировать отчеты о работе механизмов в табличном виде и в виде циклограмм за заданный пользователем промежуток времени, на основании которых генерируются рекомендации по проведению соответствующих профилактических и ремонтных работ. По результатам выполненной диагностики работы установки вдувания ПУТ во вращающиеся печи ДМК разработаны рекомендации по корректировке параметров работы механизмов установки, которые позволили сократить расход топлива и улучшить качество извести.

Эффективность создания новых и совершенствования известных металлургических технологий значительно повышается при комплексном подходе к разработке новых технологий и оборудования. Этот подход присущ исследованиям, выполняемым специалистами группы разработки технологий и оборудования для подготовки шихтовых материалов

– старшими научными сотрудниками, кандидатами технических наук Баюлом К.В., Ващенко С.В. и Худяковым А.Ю. [12–17]. На основе теоретических и экспериментальных исследований влияния физико-механических и технологических характеристик мелкофракционных шихтовых материалов на процесс прессования, качество готовой продукции (брикетов) и их металлургические свойства выполняется разработка технологических режимов брикетирования. Полученные в ходе выполнения данных разработок результаты положены в основу создания экспертной системы выбора рациональных технологий по производству брикетов широкого спектра использования, разработка которой находится на завершающей стадии. Развивается направление моделирования процессов подготовки и прессования шихт, что позволит в дальнейшем на качественно новом уровне формулировать и решать задачи оптимизации технологий брикетирования металлургического сырья.

В условиях расширения спектра перерабатываемых брикетированием материалов и в связи с этим возросшей потребностью в оборудовании для их переработки, специалистами Института при творческом участии сотрудников экспериментально-производственного предприятия ИЧМ (ЭПП ИЧМ) разработан ряд современных конструкций валковых прессов, отличающихся между собой производительностью, развиваемым усилием прессования, а также способом прижима валков (рис. 6). В настоящее время ведутся теоретические и прикладные работы по совершенствованию конструкции и технических характеристик прессового оборудования.

Научное направление работ отдела, с которого он и начинал свою деятельность, – исследование динамических процессов в металлургических машинах. В этом направлении в настоящее время продолжают исследования с.н.с., д.т.н. Веренев В.В., к.т.н., с.н.с. Подобедов Н.И., н.с. Юнаков А.М. и н.с. Коренной В.В.

Начиная с конца прошлого столетия научные разработки ведутся на основе подходов и концепции, учитывающих:

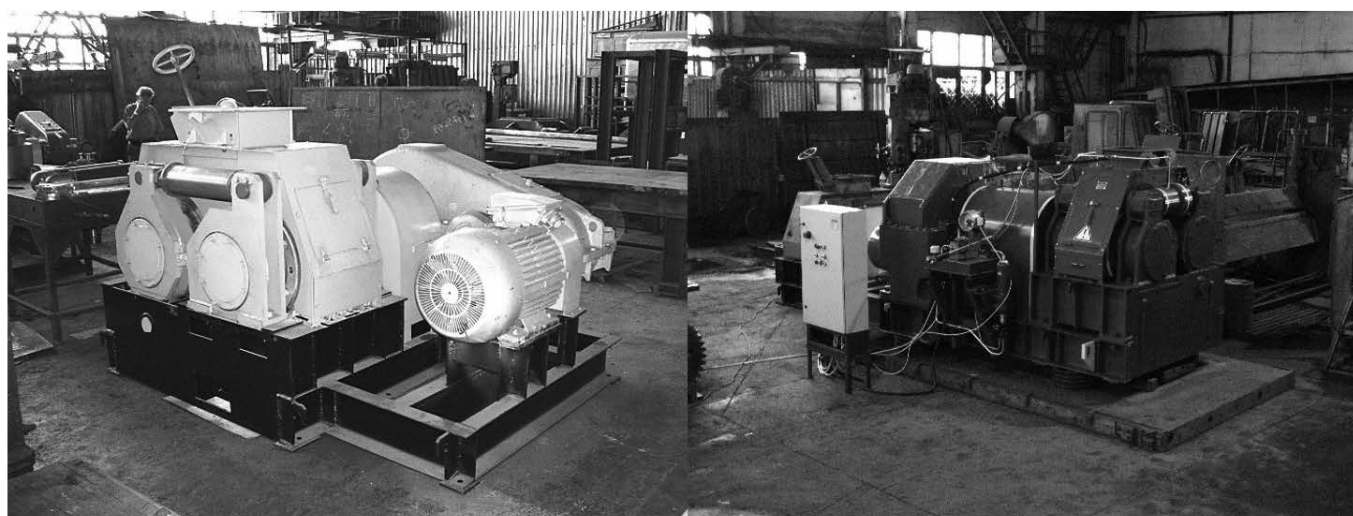
- взгляд на непрерывные прокатные станы как единую и в то же время дискретную систему взаимодействующих машин и технологий;
- связь процессов в оборудовании, режимов работы и технологии с качеством готового проката;
- анализ массовых измерений параметров динамики оборудования и технологии и установление скрытых статистических закономерностей, например, трех коэффициентов вариации механического момента;

– связь вибродинамических характеристик и ударных нагрузок с техническим состоянием (ТС) оборудования и рассеянием технологических параметров.

К числу наиболее значимых результатов исследований, выполненных сотрудниками этой группы, следует отнести следующие:

1. На основе установленных новых закономерностей и причинно-следственных связей в системе «Технология–Динамика–Техническое состояние (ТС) оборудования» впервые в мировой практике основано и развивается новое направление – диагностика ТС оборудования и стабильности технологии в переходных режимах работы, прежде всего при захвате металла валками. Разработаны и в промышленных условиях проверены два десятка новых не имеющих аналогов оригинальных способов и методов диагностирования, в частности, по новому признаку-времени запаздывания ударного импульса [18]. Благодаря этому существенно повышается эффективность распознавания критического состояния узлов, достоверность диагноза, отслеживания дрейфа и прогнозирования ТС. Появляются условия к переходу обслуживания по фактическому состоянию.

2. Разработан не имеющий аналогов метод определения и мониторинга ударных нагрузок при захвате металла валками. Метод основан на установленной



а

б

Рис. 6

Валковые прессы конструкции ИЧМ: а – с механическим прижимом валков и усилием прессования до 1200 кН; б – с гидравлическим прижимом валков и усилием прессования до 2000 кН

расчетно-эмпирической статистической зависимости динамического момента ($M_{д_{max}}$) от статического ($M_{ст.}$). Разработана компьютерная программа статистического моделирования процесса захвата полосы с учетом ряда возмущений, позволяющая отслеживать тренд и прогнозировать $M_{д_{max}}$ с учетом изменения ТС оборудования; оптимизировать работу стана по динамическому критерию; оценивать возможности освоения новых энергосберегающих технологий, сорто-размеров и режимов обжаты; накапливать данные для построения годовых упорядоченных нагрузочных диаграмм для расчета остаточного ресурса оборудования; своевременно определять клетки с превышающим допустимым уровнем динамических нагрузок.

3. Раскрыты новые закономерности формирования динамики межклетевых натяжений и толщины полосы в процессе заполнения и освобождения полосой непрерывной 6-клетевой группы стана горячей прокатки, а также прокатки сварных соединений на холодных станах. Результаты получены путем компьютерного моделирования системы уравнений, записанных в абсолютных значениях переменных. С помощью программы, как инструмента сопровождения процесса прокатки, решается задача коррекции деформационно-скоростного режима при действии технологических возмущений – отклонение толщины и температуры раската, а со стороны оборудования – зазоры в линии привода [19].

4. Разработаны и в промышленных условиях станов 1680 и 1700 опробованы защищенные патентами новые способы формирования и прокатки слябов с фигурной передней кромкой. Достигнуто существенное в 1,5–2,5 раза уменьшение ударных нагрузок при захвате полосы валками, способствующее снижению поломок и увеличению долговечности оборудования [20].

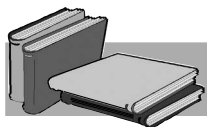
Группа динамики прокатного оборудования продолжает работы по исследованию и разработке новых способов диагностирования, совершенствованию режимов работы станов совместно с особенностями технологий, методов оценки стабильности

работы оборудования и технологического процесса и др. Опыт теоретических и экспериментальных исследований, обширная база измерений на действующих прокатных станах различного типа, разработанные методы и способы диагностики в переходных режимах, компьютерные программы статистического моделирования и мониторинга динамических нагрузок, взаимодействия непрерывной группы клетей через полосу и др. позволяют решать самые сложные и разнообразные задачи динамики и диагностики прокатных станов [21].

Результаты работы отдела за 65-летнюю историю – работающее в рациональных режимах оборудование систем загрузки доменных печей и сорто- и листопрокатные станы, валковые прессы для брикетирования мелкофракционных материалов; системы контроля и управления металлургическими процессами и т. п.

Планируемые нами научные исследования на ближайшие годы касаются перспективных, с нашей точки зрения, направлений, таких как:

- разработка новых методов управления доменной плавкой с использованием современных способов контроля процессов;
- усовершенствование технологии загрузки доменных печей многокомпонентной шихтой;
- разработка интеллектуальных систем управления доменной плавкой и экспертных систем выбора оптимального состава шихтовых материалов;
- развитие теоретических основ и усовершенствование технологии производства брикетов путем повышения эффективности технологических операций, использования новых видов связующих добавок;
- совершенствование конструкции валковых прессов, повышение их надежности, ремонтно-пригодности и удобства в эксплуатации;
- на основе теоретических и промышленных исследований разработка технических решений как по созданию оборудования с минимальным уровнем динамики переходных процессов, так и разработка эффективных решений по режимным параметрам действующих станов.

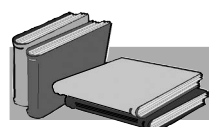


ЛИТЕРАТУРА

1. Большаков В.И. Научные направления деятельности отдела технологического оборудования и систем управления. Сб. науч. тр. ИЧМ «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии». 2003. Вып. 6. С. 343–355.
2. Большаков В.И. Технология высокоэффективной энергосберегающей доменной плавки. К.: Наукова думка, 2007. 412 с.
3. Bolshakov V.I., Semenov Yu.S., Ivancha N.G., Vishnyakov V.I., Shumelchik E.I., Podkorytov A.L., Semion I.Yu., Kuznetsov A.M., Zubenko A.V. 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. P. 158–165.
4. Ivancha N.G., Muravyova I.G., Shumel'chik E.I., Vishnyakov V.I., Semenov Yu.S. Complex Mathematical Model of the Distribution of Multicomponent Charge in a Blast Furnace. *Metallurgist*. May 2018. Vol. 62. Iss. 1–2. P. 95–100.
5. Муравьева И.Г., Тогобицкая Д.Н., Семенов Ю.С., Иванча Н.Г., Белькова А.И., Шумельчик Е.И., Степаненко Д.А. Создание интеллектуальных систем поддержки принятия решений по управлению доменной плавкой. Новые подходы. К.: Наукова думка, 2019. 272 с.
6. Большаков В.И., Муравьева И.Г., Семенов Ю.С. Применение радиолокационных систем измерения поверхности засыпи шихты для контроля и управления доменной плавкой. Днепропетровск: Пороги, 2013. 364 с.

7. Семенов Ю.С., Шумельчик Е.І., Горупаха В.В. Діагностика та управління доменною плавкою в змінних паливно-сировинних умовах. Дніпро: Домінанта Прінт, 2018. 260 с.
8. 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. P. 802–806.
9. 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. P. 389–393.
10. 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. Iss. 11–12. P. 950–958.
11. 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. Iss. 3–4. P. 291–297.
12. Vashchenko S.V., Khudyakov A.Yu., Baiul K.V., Semenov Yu.S. Selecting the Batch Composition in Briquetting. *Steel in Translation*. Allerton Press, Inc. 2018. P. 509–512.
13. Ващенко С.В., Худяков А.Ю., Байул К.В., Семенов Ю.С. Создание локальных моделей адгезионного сцепления частиц при брикетировании. *Сталь*. 2019. № 5. С. 4–8.
14. Kieush L., Boyko M., Koveria A., Khudyakov A., Ruban A. Utilization of the Prepyrolyzed Technical Hydrolysis Lignin as a Fuel for Iron Ore Sintering. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. № 1/6 (97). P. 34–39.
15. Khudyakov A.Yu., Vashchenko S.V., Baiul K.V., Semenov Yu.S. Kaolin Raw Material Briquetting for Lump Chamotte Production. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2018. Vol. 59 (4). P. 333–337.
16. Baiul K.V. Effect of the geometrical parameters of roll press forming elements on the briquetting process: analytical study. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. July 2012. Vol. 51. Iss. 3–4. P. 157–164.
17. Байул К.В. Синтез рациональной конструкции валкового пресса для производства композитного твердого топлива. *Проблемы региональной энергетики*. 2019. № 2(43). С. 103–116.
18. Веренев В.В. Снижение динамических нагрузок и диагностика широкополосных станов в переходных режимах. Николаполь: СПД Фельдман О.О., 2014. 203 с.
19. Веренев В.В., Путнюки А.Ю., Подобедов Н.И. Переходные процессы при непрерывной прокатке. Д.: Литограф, 2017. 116 с.
20. Веренев В.В., Большаков В.И., Путнюки А.Ю., Маншилин А.Г., Мацко С.В. Динамические процессы в клетях широкополосного стана 1680. Днепропетровск: ИМА-пресс, 2011. 184 с.
21. Веренев В.В. Динамические процессы в полосовых станах холодной прокатки. Днепропетровск: Лира, 2015. 112 с.

Поступила 23.09.2019



REFERENCES

1. Bolshakov, V.I. (2003). Scientific activities of the department of technological equipment and control systems. *Sb. nauch. tr. IChM "Fundamental'nye i prikladnye problemy chernoj metallurgii". Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy, Collection of scientific works of the ISI*, iss. 6, pp. 343–355 [in Russian].
2. Bolshakov, V.I. (2007). High efficiency energy saving blast furnace technology. Kyiv: Naukova dumka, 412 p. [in Russian].
3. Bolshakov V.I., Semenov Yu.S., Ivancha N.G., Vishnyakov V.I., Shumelchik E.I., Podkorytov A.L., Semion I.Yu., Kuznetsov A.M., Zubenko A.V. (2012). Study of the Flow of Burden Materials and their Distribution on the Furnace Top of a Modern Blast Furnace. *Metallurgical and Mining Industry*, vol. 4, no. 3, pp. 158–165 [in English].
4. Ivancha, N.G., Muravyova, I.G., Shumelchik, E.I., Vishnyakov, V.I., Semenov, Yu.S. (2018). Complex Mathematical Model of the Distribution of Multicomponent Charge in a Blast Furnace. *Metallurgist*, vol. 62, iss. 1–2, pp. 95–100 [in English].
5. Muravyova I.G., Togobitskaya D.N., Semenov Yu.S., Ivancha N.G., Belkova A.I., Shumelchik E.I., Stepanenko D.A. (2019). Creating intelligent decision support systems for blast furnace management. New approaches. Kyiv: Naukova dumka, 272 p. [in Russian].
6. Bolshakov, V.I., Muravyova, I.G., Semenov, Yu.S. (2013). Application of radar systems for measuring the charge backfill surface for controlling and controlling blast furnace melting. Dnepropetrovsk: Porogi, 364 p. [in Russian].
7. Semenov, Yu.S., Shumelchik, E.I., Gorupakha, V.V. (2018). Diagnosis and management of blast furnace melting under variable fuel and raw materials conditions. Dnipro: Dominanta Print, 260 p. [in Ukrainian].
8. Semenov, Yu.S., Shumelchik, E.I., Horupakha, V.V. (2018). Expert Module of the Thermal Probe System for Blast Furnace Charging Control. *Steel in Translation*, vol. 48, no. 12, pp. 802–806 [in English].
9. Semenov, Yu.S., Shumelchik, E.I., Horupakha, V.V. et al. (2017). Using Thermal Probes to Regulate the Batch Distribution in a Blast Furnace with Pulverized-Coal Injection. *Steel in Translation*, vol. 47, no. 6, pp. 389–393 [in English].
10. 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*, vol. 61, iss. 11–12, pp. 950–958 [in English].

11. Semenov, Yu.S., Shumel'chik, E.I., Gorupakha, V.V. et al. (2017). Monitoring Blast Furnace Lining Condition during Five Years of Operation. *Metallurgist*, vol. 61, iss. 3–4, pp. 291–297 [in English].
12. Vashchenko, S.V., Khudyakov, A.Yu., Baiul, K.V., Semenov Yu.S. (2018). Selecting the Batch Composition in Briquetting. *Steel in Translation*. Allerton Press, Inc., pp. 509–512 [in English].
13. Vashchenko, S.V., Hudiakov, A.Ju., Baiul, K.V., Semenov, Yu.S. (2019). Creation of local models of adhesion of particles during briquetting. *Stal'*, no. 5, pp. 4–8 [in Russian].
14. Kieush, L., Boyko, M., Koveria, A., Khudyakov, A., Ruban A. (2019). Utilization of the Prepyrolyzed Technical Hydrolysis Lignin as a Fuel for Iron Ore Sintering. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, no. 1/6 (97), pp. 34–39 [in English].
15. Khudyakov, A.Yu., Vashchenko, S.V., Baiul, K.V., Semenov, Yu.S. (2018). Kaolin Raw Material Briquetting for Lump Chamotte Production. *Refractories and Industrial Ceramics*, vol. 59 (4), pp. 333–337 [in English].
16. Baiul, K.V. (July 2012). Effect of the geometrical parameters of roll press forming elements on the briquetting process: analytical study. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, vol. 51, iss. 3–4, pp. 157–164 [in English].
17. Baiul, K.V. (2019). Synthesis of a rational design of a roll press for the production of composite solid fuel. *Problemy regionalnoi energetiki. Problems of regional energy*, no. 2 (43), pp. 103–116 [in Russian].
18. Verenev, V.V. (2014). Dynamic load reduction and diagnostics of broadband mills in transient conditions. Nikopol: SPD Feldman O.O., 203 p. [in Russian].
19. Verenev, V.V., Putnoki, A.Yu., Podobedov, N.I. (2017). Continuous rolling transients. D.: Litograf, 116 p. [in Russian].
20. Verenev, V.V., Bolshakov, V.I., Putnoki, A.Yu., Manshilin, A.G., Matsko, S.V. (2011). Dynamic processes in the stands of broadband mill 1680. Dnepropetrovsk: IMA-press, 184 p. [in Russian].
21. Verenev, V.V. (2015). Dynamic processes in cold rolling strip mills. Dnepropetrovsk: Lira, 112 p. [in Russian].

Received 23.09.2019

Анотація

І.Г. Муравйова, д-р техн. наук, ст. науч. співр., зав. відділу,
e-mail: irinamuravyova@gmail.com

Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України (Дніпро, Україна)

Комплексні дослідження технологій, обладнання та систем автоматизації металургійного виробництва

Показано основні етапи формування тематики досліджень відділу технологічного обладнання та систем управління. Виконано аналіз результатів наукової діяльності трьох підрозділів відділу. Представлено основні розробки групи машин доменного виробництва, до числа яких можна віднести: технологію завантаження багатокомпонентної шихти; комплексну математичну модель формування багатокомпонентних порцій шихтових матеріалів, їх завантаження в бункер безконусного завантажувального пристрою (БЗП), вивантаження з бункера і розподілу на поверхні засипу; інтелектуальну систему підтримки прийняття рішень з управління доменною плавкою; нові способи контролю і управління доменною плавкою з використанням інформації сучасних систем автоматизованого контролю. Показано основні напрямки співпраці з металургійними підприємствами галузі. Представлено основні напрями досліджень групи розробки технологій і обладнання для підготовки шихтових матеріалів, що охоплюють теоретичні і експериментальні дослідження впливу фізико-механічних і технологічних характеристик дрібнофракційних шихтових матеріалів на процес пресування, якість брикетів і їх металургійні властивості, а також створення технічних рішень механічного обладнання для брикетування. Представлено результати досліджень і розробки нових способів діагностування, вдосконалення режимів роботи станів спільно з особливостями технологій, методів оцінки стабільності роботи обладнання і технологічного процесу, які виконують співробітники групи динаміки прокатного обладнання.

Ключові слова

Способи контролю і управління доменною плавкою, технологія завантаження, багатокомпонентна шихта, комплексна модель розподілу шихти на колошникові, технології та обладнання для брикетування, динаміка прокатного обладнання.

Summary

I.G. Muravyova, Dr. Sci. (Engin.), Senior Research Scientist, Head of the Department, e-mail: irinamuravyova@gmail.com

Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov of the NAS of Ukraine (Dnipro, Ukraine)

Integrated research of technologies, equipment and automation systems of metallurgical production

The main stages of the formation of research topics of the department of technological equipment and control systems are shown. The analysis of the results of scientific activities of the three divisions of the department has been made. The main developments of a group of blast furnace machines are presented, which include: technology for loading a multicomponent charge; a complex mathematical model of the formation of multicomponent batches of charge materials, their loading into the bunker of the bell-less top (BLT), unloading from the bunker and distribution on the surface of the mound; intelligent decision support system for blast furnace management; new methods of control and management of blast furnace using information from modern automated control systems. The main directions of cooperation with metallurgical enterprises of the industry are shown. The main directions of research by a group of developing technologies and equipment for the preparation of charge materials are presented, covering theoretical and experimental studies of the influence of physic-mechanical and technological characteristics of finely charged charge materials on the pressing process, the quality of briquettes and their metallurgical properties, as well as the creation of technical solutions for mechanical equipment for briquetting. The results of research and development of new methods for diagnosing, improving the operating conditions of mills are presented together with the features of technologies, methods for assessing the stability of equipment and the technological process, which are performed by employees of the rolling equipment dynamics group.

Keywords

Methods of control and management of blast furnace smelting, loading technology, multicomponent charge, a comprehensive model of the distribution of the charge on the top, technologies and equipment for briquetting, the dynamics of rolling equipment.

А.С. Нестеров, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., зав. отделом, e-mail: asn.dnepr@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0183-0327>

А.Л. Чайка, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., зав. лаб., e-mail: chaykadp@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-1678-2580>

Л.И. Гармаш, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., e-mail: larysagar@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6873-6685>

Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины (Днепр, Украина)

Отдел металлургии чугуна Института черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины. История и современность

В статье представлены приоритетные направления исследований и основные научные достижения отдела металлургии чугуна (ОМЧ) Института черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины (ИЧМ) начиная с момента его основания и до настоящего времени.

Основателем ОМЧ был академик Михаил Власович Луговцов. С помощью разработанной им статистической теории доменного процесса на основе положений теории теплового потока, методов математики, механики и физической химии были количественно описаны процессы доменной плавки.

Большой вклад в развитие теории и практики доменного производства внес академик Зот Ильич Некрасов. Направления интенсификации доменного процесса за счет использования природного газа, комбинированного дутья и вдувания пылеугольного топлива (ПУТ), обоснования возможностей и строительство доменных печей большого объема, совершенствование сырьевой базы доменного производства предопределили пути развития отрасли на многие десятилетия и не утратили актуальности и сейчас.

Благодаря Зоту Ильичу в ИЧМ для проведения исследований была создана прекрасная лабораторная база, которая в то время не уступала лучшим мировым. Доменщики ОМЧ работали на всех крупнейших металлургических предприятиях СССР и внесли большой вклад в развитие многих направлений доменного производства. Результаты проводимых в отделе работ являлись базой для разработки новых технологий и материалов и способствовали укреплению авторитета советской металлургии в мире. В статье перечислены самые значимые разработки научных сотрудников ОМЧ в советский период.

Исследования, которые выполняются в отделе в настоящее время, развивают и расширяют эти направления с учетом требований к качеству конечного продукта и современных топливно-сырьевых условий, в которых работает металлургия Украины. На основе системного анализа процессов и перспектив развития доменного производства специалистами отдела разрабатываются рекомендации по повышению его эффективности и снижению ресурсо- и энергоемкости. Особое внимание уделяется вопросам продления кампании доменных печей, разработке технологий их стабильной работы в стационарных и нестационарных условиях плавки, совершенствованию технологии окомкования железорудного сырья и выплавки чугуна на основе управления металлургическими свойствами шихтовых материалов, в том числе, с высоким содержанием вторичных ресурсов, развитию и реализации научно-практических основ технологии эффективного применения ПУТ.

Ключевые слова: доменный процесс, комбинированное дутье, технология доменной плавки, доменные печи большого объема, вдувание пылеугольного топлива, качество железорудного сырья, продление кампании доменной печи.

Основателем и первым руководителем отдела металлургии чугуна Института черной металлургии был академик М.В. Луговцов, один из создателей статистической теории доменного процесса, которая количественно описывала процессы доменной плавки на основе положений теории теплового потока, методов математики, механики и физической химии. Под его руководством были заложены основополагающие принципы научной деятельности коллектива и начаты исследования, направленные на интенсификацию доменной плавки: обогащение дутья кислородом; разработка керченских руд; производство офлюсованного агломерата с пониженным содержанием мышьяка; роль магнезиальных шлаков в доменном процессе [1].

Большой вклад в развитие доменного производства внес многолетний руководитель Института черной металлургии и отдела металлургии чугуна

академик З.И. Некрасов. Под его руководством были определены не только основные научные направления исследований в области доменного производства, но и приоритетные направления развития отрасли на многие годы [2]:

- обоснование технической и экономической целесообразности и технологическое сопровождение строительства доменных печей большого объема, оснащение их современными средствами нагрева дутья, загрузки и распределения шихтовых материалов на колошнике;

- совершенствование сырьевой базы доменного производства, разработка требований к качеству железорудного сырья и кокса за счет совершенствования технологии спекания и формирования шихты;

- интенсификация доменной плавки на основе использования кислорода и природного газа (ПГ), развитие теоретических и технологических основ

комбинированного дутья с обогащением его кислородом и вдуванием в горн печи природного газа;

– научное обоснование применения в доменном производстве новых углеводородных ресурсов в качестве топливных добавок и заменителей кокса, разработка основ технологий доменной плавки с вдуванием пылеугольного топлива (ПУТ) и коксового газа;

– разработка технологии доменной плавки с применением кокса высокого качества;

– разработка технологии и реализация процесса производства офлюсованных углеродсодержащих железорудных брикетов как одного из шихтовых материалов для доменной плавки, реализация комплексной программы брикетирования железорудного сырья с учетом современных требований к показателям качества.

Одним из эффективных способов наращивания производства чугуна является увеличение объема и производительности доменных печей, а лимитирующими факторами при строительстве доменных печей большого объема является стойкость их холодильников, кладки и оборудования. Необходимо было научно обосновать возможность увеличения их полезного объема, разработать мероприятия по стабилизации технологического режима за счет оптимизации первичного шлакообразования и увеличения глубины окислительной зоны, стабилизации газораспределения на основе выбора рациональной программы загрузки. Для решения этих задач в ОМЧ были сформированы исследовательские группы, научное руководство которыми осуществлял З.И. Некрасов, а в их работе принимали активное участие В.Л. Покрышкин, Ф.Н. Москалина, О.М. Кудрявцев, В.В. Врублевский и др. Были получены очень важные результаты о характере распределения материалов на поверхности засыпи колошника с замером глубины воронки, толщины слоев железорудных материалов и кокса, закономерностях процессов восстановления оксидов железа в шахте печи и свойствах извлеченных с различных горизонтов печи шихтовых материалов.

В результате испытаний, проведенных при задувке самых крупных доменных печей СССР с целью установления научно-обоснованных условий обеспечения процессов плавки в сверхмощных доменных печах, было показано, что укрупнение агрегатов значительно ужесточает требования к управлению режимом плавки, и были разработаны меры по улучшению качества железорудных материалов и кокса, совершенствованию приемов использования комбинированного дутья, определены параметры распределения железорудных материалов и газа по диаметру колошника и в горне, разработаны принципиально новые технические решения шихтоподачи, загрузки, придоменной грануляции шлака, оснащения печей современными средствами нагрева дутья, загрузки и распределения шихтовых материалов на колошнике и др. [3].

Сотрудники ОМЧ принимали самое активное участие в проектировании, разработке технологии плавки, предпусковых испытаниях и запуске крупнейших в мире доменных печей Новолипецкого металлурги-

ческого комбината (НЛМК) объемом 2000 и 3200 м³, Западно-Сибирского металлургического комбината (ЗСМЗ) объемом 3000 м³, «Криворожстали» объемом 5000 м³, Череповецкого меткомбината объемом 5500 м³ [4]. Накопленный специалистами ОМЧ опыт по задувке и освоению сверхмощных доменных печей значительно расширил представление об особенностях их эксплуатации и позволил на практике подтвердить технологические и теоретические прогнозы об экономической целесообразности их строительства. Основные положения разработанной методики пусковых исследований доменных печей с небольшими усовершенствованиями применяются и в настоящее время.

Крупным проектом были начаты академиком М.В. Луговцовым и продолжены под руководством академика З.И. Некрасова работы по изучению и организации эффективного использования руд Керченского месторождения, разработке технологии их обогащения и окускования, в которых активное участие принимали ведущие научные сотрудники ОМЧ – Н.И. Красавцев, И.Б. Страшников, П.А. Тациенков, Н.А. Гладков, А.Г. Ульянов.

Комплексные исследования по определению рациональных способов использования руд Керченского месторождения, отличающихся сложным минералогическим составом и наличием мышьяка, показали возможность их обогащения промывкой с отсадкой и получением концентратов, содержащих 46–49 % железа с последующей их агломерацией. Исследования, включающие определение исходного состава извлекаемых руд, уровня их обогащения и качества получаемого концентрата, разработку технологии получения офлюсованного агломерата и его проплавку в доменных печах завода «Азовсталь», определение качества и пригодности выплавленного металла определили способы использования значительного количества коричневых руд по разработанной схеме с применением местного высокосортного известняка при проплавке такого агломерата в доменных печах в дозируемом количестве. Была доказана возможность получения железорудных концентратов с содержанием 50 % железа и разработаны эффективные способы снижения содержания мышьяка в процессе обогащения руд и агломерации их концентратов, освоена технология производства офлюсованного агломерата заданного качества и проплавка его в доменных печах в определенном количестве, не приводящем к снижению его качества [5].

В середине прошлого века на предприятиях отрасли началось широкое внедрение способа использования в доменной плавке природного газа совместно с обогащением дутья кислородом. Возможность сокращения расхода кокса подачей в горн углеродсодержащих материалов была подтверждена результатами теоретических и экспериментальных исследований фурменной зоны, поведения газов в периферийной области и промышленных опробований приемов подачи колошниковой пыли и других материалов в шахту и фурмы доменной печи. Для стабилизации теплового состояния горна было

предложено совместно с природным газом подавать обогащенное кислородом дутье. Были установлены закономерности изменения основных характеристик доменного процесса: степени прямого восстановления; тепловых затрат; развития процессов термической диссоциации углеводородов; кинетической энергии дутья, оптимизация которой обеспечивает необходимый уровень обработки центральной части горна, нормальную отработку продуктов плавки, стабилизацию периферийного потока, ограничение развития термической диссоциации углеводородов и др. [6].

Результаты фундаментальных научных исследований легли в основу принципиально новых технологических решений, не имеющих аналогов в мировой практике, и были реализованы на предприятиях Украины и мира с высоким экономическим эффектом. За широкое внедрение природного газа в доменном производстве академик АН УССР З.И. Некрасов и кандидат технических наук Н.И. Красавцев в 1960 г. стали лауреатами Ленинской премии.

Одновременно с разработкой высокопроизводительной и экономичной технологии доменной плавки на комбинированном дутье в ОМЧ проводились исследования по улучшению качества железорудного сырья. На лабораторной базе отдела были выполнены обширные исследования по отработке технологии спекания высококачественного офлюсованного агломерата. Всесторонняя расчетно-аналитическая оценка эффективности более глубокого обогащения руд с содержанием железа в концентратах не ниже 65 % показала хорошие перспективы по увеличению производительности, снижению расхода кокса и экономической эффективности применения высокообогащенного агломерата в доменном производстве. Результаты опытно-промышленной плавки показали, что повышение содержания железа в железорудной части шихты на 4 % приводит к увеличению производительности на 2,5–3 % и снижению расхода кокса на 2,2–2,5 % на каждый дополнительный процент железа в шихте.

Направление форсированного ведения доменной плавки за счет внедрения комбинированного дутья, обогащенного кислородом в сочетании с углеводородами, при небольших капитальных затратах показывало высокую эффективность, но имело и недостатки – по мере снижения расхода кокса ухудшалась управляемость печей по газодинамике, а форсированный ход печей сокращал длительность их кампании. Направление, обеспечивающее высокопроизводительную экономичную работу доменных печей за счет проплавки высокообогащенного железорудного сырья, выигрывало в сравнении с технологией доменной плавки на комбинированном дутье, но требовало очень больших капитальных затрат. В результате руководящими органами страны было принято решение поручить ИЧМ расширить научную тематику, обеспечивающую разработку технологии доменной плавки на комбинированном дутье высоких параметров. Освоение этой технологии осуществлялось в несколько этапов на разных металлургических заво-

дах и в разных технологических и сырьевых условиях работы доменных печей. Исследования под руководством З.И. Некрасова проводили Ф.Н. Москалина, М.Д. Жембус, П.Я. Мухин, Э.Я. Аксенич, Э.С. Хомяков, М.Т. Бузовера, Н.М. Можаренко и др.

Технология доменной плавки с использованием природного газа, реализованная на доменной печи завода им. Петровского, позволила снизить расход кокса на 10–16 % и повысить производительность печи на 3–5 %; технология повышения давления газа на колошнике, впервые опробованная на заводе им. Дзержинского, в дальнейшем была освоена на 50 отечественных печах, на которых выплавлялось около 70 % общесоюзного чугуна; технология интенсификации доменной плавки с применением комбинированного дутья кислорода (до 24–25 %) и природного газа, внедренная на доменной печи № 12 завода им. Дзержинского, позволила увеличить производительность печи на 9,9 %, а расход кокса снизить на 19,7 %.

В опытных плавках на меткомбинате «Криворожсталь» в 1960-х годах степень обогащения дутья кислородом впервые достигла 30 % при устойчивой работе печи. Каждый процент увеличения содержания кислорода в дутье приводил к приросту производства 1,9 %, а коэффициент замены кокса природным газом приближался к 0,9 кг/м³. В условиях Новолипецкого металлургического завода в 1970-х степень обогащения дутья кислородом достигла 35 %, на 1 % дополнительного кислорода прирост производства составлял 1,9–2 %, коэффициент снижения расхода кокса на 1 м³ природного газа составил 0,91 кг/м³. А в 1980-х в этом же цехе были проведены плавки с содержанием кислорода 40 %. Эти результаты стали определяющими для повышения производительности и экономичности работы доменных цехов страны на долгое время. Разработка мероприятий по совершенствованию режимов работы оборудования доменных печей № 5 и 6 Нижнетагильского металлургического комбината (НТМК), работающих на дутье, обогащенном до 30 % кислорода, обеспечили годовой экономический эффект в сумме около 390 тысяч рублей.

Несмотря на высокую эффективность доменной плавки на комбинированном дутье, ведущие специалисты хорошо понимали, что запасы природного газа не безграничны, поэтому доменщики ОМЧ одними из первых в отрасли стали развивать перспективные коксозамещающие технологии. Дальнейшим развитием технологии комбинированного дутья стали исследования по использованию в доменной плавке углеводородных заменителей природного газа – коксового газа. Результаты опытных плавок с его применением на «Запорожстали» и Макеевском металлургическом заводе подтвердили высокую эффективность и перспективность этой технологии, которая позволяла получить экономию кокса 6–7 % и увеличение производительности печей на 5 %. Особенно актуальным это направление стало во времена ограничения поставок природного газа и роста его стоимости.

В 1966 году на заводе «Запорожсталь» была построена разработанная по технологическому заданию ИЧМ и проекту Укргипромеца первая в Украине установка для вдувания пылеугольного топлива в горн доменной печи № 3 объемом 1300 м³ (инициатором и руководителем этих разработок был академик З.И. Некрасов) [7]. Однако, из-за низкого качества шихтовых материалов, отсутствия надлежащей угольной базы, необходимого помольного оборудования в то время технология не получила должного развития.

Перспективные исследования ИЧМ были направлены на автоматизацию технологического процесса доменной плавки, повышение надежности и сроков службы агрегатов и оборудования, создание новых технологических решений, предусматривающих резкое сокращение расхода кокса и энергосбережение. Разрабатывается технология доменной плавки с применением горячих восстановительных газов, полученных из низкосортных углей, направленная на сокращение расхода кокса в 2–3 раза с последующим переходом к бескоксовому получению жидкого металла в шахтной печи.

В 80-е годы под руководством З.И. Некрасова в ИЧМ были начаты комплексные исследования по перспективному инновационному направлению – разработка основных положений и освоение в опытно-промышленных условиях процесса производства нового вида металлургического сырья – офлюсованных углеродсодержащих брикетов из частично восстановленных богатых железорудных концентратов и разработка технологии доменной плавки с их использованием. Было доказано, что восстановление окислов железа на подготовительной стадии доменной плавки позволит существенно увеличить производительность печей.

Теоретической основой создания брикетов стали физические и кристаллохимические особенности низшего окисла железа – вюстит Fe_xO . Способ окискования включал предварительный нагрев материала с последующим формированием брикетов за счет наложения давления при температурах 800–850 °С. Условия подготовки железорудных концентратов, формирования брикетов и особенности их структуры позволяли вводить в их состав флюсующие и углеродсодержащие добавки [8]. Теоретические и экспериментальные исследования структуры и пластических свойств оксидов железа и твердых растворов на их основе, закономерностей уплотнения материалов, отработка технологических режимов получения брикетов на лабораторных установках, изучение их поведения при нагреве и восстановлении позволили изготовить в экспериментально-производственных мастерских ИЧМ экспериментальные установки для нагрева и восстановления железорудных концентратов и валковый брикетный пресс производительностью 2 т/ч. На них были отработаны параметры технологии, получены представительные опытные партии брикетов и всесторонне изучены их металлургические свойства. Результаты исследования металлургических свойств частично брикетированной

угольной шихты (при работе на коксе с долей брикетов 18,1 %) и опытно-промышленных и промышленных плавов на доменных печах «Криворожстали» показали улучшение показателей работы доменных печей – расход кокса 509 кг/т чугуна, удельная производительность 1,71 т/сут.

И хотя промышленные партии брикетов не были получены, поскольку опытно-промышленную установку Северного горнообогатительного комбината (СевГОКа) не удалось вывести на проектные технологические режимы, разработанные в ходе выполнения проекта, научные положения и созданные брикетные прессы получили дальнейшее развитие и нашли широкое применение при брикетировании различных материалов и отходов металлургического производства. Разработанная технология стала базой для дальнейших работ в этом направлении, которые успешно ведутся в ИЧМ в настоящее время.

Высокий научный уровень работ отдела всегда обеспечивался самым современным исследовательским оборудованием. В советские годы отдел металлургии чугуна располагал комплексом лабораторного оборудования, не уступавшим лучшим зарубежным институтам. Для определения состояния и структурных параметров, обуславливающих металлургические свойства и технологическую ценность сырья и продуктов доменной плавки, в ОМЧ использовались установки для высокотемпературных исследований, включающие оборудование для определения реакционной способности кокса, восстановимости железорудных материалов, их размягчения и плавкости (плавильный микроскоп, вискозиметры, устройства измерения поверхностных свойств жидких оксидных расплавов), а также такое уникальное оборудование, как электронные микроскопы, высокотемпературный дилатометр, инфракрасный спектрометр, рентгеноспектральные микроанализаторы (микросонды). Специалисты ОМЧ одними из первых в отрасли начали широко применять для изучения металлургических процессов и материалов методы инфракрасной спектроскопии, рентгеновского микроанализа, γ -резонансной (мессбауэровской) спектроскопии, дифференциально-термического анализа, магнитного анализа энергетического состояния шихтовых материалов, физико-химические методы определения адсорбции и десорбции инертных и восстановительных газов на железорудных материалах и коксе, характера распределения в них пористости, определения равновесных условий взаимодействия газов и оксидов железа и др.

Для изучения металлургических свойств сырья в соответствии с действующими и разрабатываемыми ГОСТами на экспериментальном производстве ИЧМ были разработаны и изготовлены:

- модифицированная установка Линдера с комплексом газогенераторов с системой управления, регистрирующей аппаратурой, устройствами взвешивания, рассева, калибровки для определения поведения железорудных материалов в «сухой» зоне доменной печи;

- установки для исследования процессов агрегатных

превращений материалов в восстановительной среде под нагрузкой с системой управления и фиксирования параметров изменения состояния материалов;

– установки изучения высокотемпературных устройств на базе печей Таммана, позволявшие исследовать закономерности глубоких превращений сырьевых материалов доменной плавки при высоких температурах;

– комплекс барабанов, в том числе для испытания по отечественному ГОСТу и японскому стандарту для определения механических характеристик сырья.

Использование самого современного оборудования и методик позволяло проводить уникальные эксперименты, моделирующие различные процессы в таком сложном агрегате, как доменная печь, изучать и прогнозировать свойства железорудных материалов и продуктов плавки. Результаты этих экспериментов в дальнейшем использовались при планировании и проведении опытных плавов уже в промышленных условиях. Кроме того, пущенная в 1974 г. доменная печь № 9 завода «Криворожсталь» была серьезно оснащена не только новым технологическим оборудованием и автоматизированными системами, но и исследовательским оборудованием, позволявшим изучать развитие процессов плавки на различных горизонтах шахты и в горне печи, что позволяло по результатам экспериментов оперативно корректировать или изменять соответствующие параметры технологического режима [9].

Институт черной металлургии долгие годы был головной научной организацией по многим направлениям в системе Министерства черной металлургии СССР, в том числе и по аглодоменному производству. Большой вклад в развитие как фундаментальных теоретических основ доменного процесса, так и в реализацию их на практике при строительстве и реконструкции крупнейших доменных печей и агломерационных фабрик внесли ведущие научные сотрудники: Большаков В.И., Можаренко Н.М., Товаровский И.Г., Ульянов А.Г., Бузоверя М.Т., Москалина Ф.Н., Гладков Н.А., Жембус М.Д., Бородулин А.В., Джигота А.Д., Гребенкин Н.А., Ободан Я.М., Гаврилов Е.Е., Приходько Ю.А. и многие другие.

Крупным ученым-практиком в области агломерационного производства был один из научных руководителей отдела канд. техн. наук А.Г. Ульянов. Он занимался исследованиями по подготовке сырья к доменной плавке; повышению эффективности агломерационного производства за счет оптимизации свойств агломерационного и доменного возврата; снижению потерь чугуна со шлаком; сокращению расхода кокса на выплавку чугуна за счет оптимизации состава шлака и улучшения его свойств для доменных печей, проплавляющих 100 % агломерата с использованием флюсующих магнезиальных добавок; применению золы горючих сланцев в шихте для получения окатышей и др.

Д-р техн. наук А.В. Бородулин исследовал системные аспекты управления энергетическими ресурсами (твердым, жидким, газообразным топливом, нагретым дутьем, кислородом, азотом, водой и паром

для охлаждения агрегатов) при производстве чугуна и ферросплавов в доменных цехах и на предприятиях полного металлургического цикла. В своих работах он продолжал развивать энергетическую теорию И.Д. Семикина, разработал уникальную теплоэнергетическую модель доменной плавки. Многолетние экспериментальные исследования тепловой работы системы охлаждения доменных печей внесли существенный вклад в понимание тепловых процессов периферийной зоны доменной печи и привели к разработке оригинальных технических решений в области энергосбережения [10].

Научная деятельность д-ра техн. наук И.Г. Товаровского посвящена системному анализу доменной плавки на основе аналитических и экспериментальных исследований с использованием математического моделирования; проблемам коксосбережения в доменной плавке; разработке теоретических основ малококсовых и бескоксовых доменных плавов и нетрадиционных металлургических технологий на основе использования продуктов газификации низкосортных углей. На основании результатов этих исследований установлена принципиальная возможность полной замены кокса продуктами газификации углей при эволюционной перестройке доменной печи на шахтно-горновой агрегат бескоксового получения первичного металла. Разработанная им методика многозонного расчета показателей и процессов доменной плавки позволяет описывать закономерности протекания процессов в различных режимах и определять пути их совершенствования [11].

Большое внимание в отделе всегда уделялось исследованию качества железорудного сырья и кокса как важнейших факторов, определяющих интенсивность и экономичность доменной плавки. Для изучения поведения материалов в различных зонах доменной печи и прогнозирования на этой основе параметров доменной плавки, исследования качества железорудных материалов и кокса в ОМЧ была создана хорошо оборудованная лаборатория физико-химических процессов плавки, которую возглавлял канд. техн. наук Н.А. Гладков. Под его руководством была разработана методика комплексной оценки, включающая моделирование поведения железорудных материалов в сухой зоне доменной печи, в зоне размягчения-плавления и капельного течения и расчетно-аналитический эксперимент [12]. Изучение процессов формирования и отделения жидких фаз из размягченного слоя железорудных материалов, закономерностей образования первичных, промежуточных и металлоуглеродистых расплавов позволили сформулировать требования к высокотемпературным свойствам железорудных материалов и разработать качественные показатели агломератов, окатышей и руд.

Широкий круг очень важных для доменного производства вопросов включали исследования, проводившиеся под руководством канд. техн. наук Н.М. Можаренко: повышение эксплуатационной надежности и увеличение межремонтных кампаний доменных печей; разработка технологий получения и

применения в доменной плавке жидких и газообразных заменителей кокса; теоретическое обоснование процесса выплавки низкокремнистого чугуна; подготовка и технологическое сопровождение задувок и выдувок доменных печей; влияние восстановления железорудной шихты и науглероживания чугуна на характер движения материалов в доменной печи; изучение состава и свойств гарнисажа; особенности технологии доменной плавки с вдуванием ПУТ и др. [13].

В 1990–2000 гг. деятельность Института проходила в сложных условиях, вызванных изменением структуры и сокращением объемов производства в черной металлургии. После развала СССР в Украине осталось более двух третей его научного потенциала в металлургии, однако была полностью разрушена отраслевая система координации и финансирования научных исследований, что привело к существенному уменьшению их объема, снижению количества внедряемых в производство научных разработок и отрицательно сказалось на престижности научной работы. Промышленные предприятия продолжали работать по технологиям, созданным в прежние годы, упор делался на поддержание оборудования в рабочем состоянии с минимальной модернизацией. Такая ситуация неизбежно вела к снижению конкурентоспособности продукции горно-металлургического комплекса (ГМК), поэтому в 1995 г. была принята «Концепция развития горно-металлургического комплекса Украины до 2010 г.», а в 2004 г. – «Государственная программа развития и реформирования горно-металлургического комплекса Украины до 2011 г.», в подготовке которых доменщики ИЧМ принимали самое активное участие.

После возвращения ИЧМ в 1992 г. в систему НАН Украины тематика исследований отдела кардинально не изменилась, но большее значение стало придаваться их научной составляющей. К концу XX века положения классической теории доменного процесса требовали дальнейшего развития, глубокой корректировки и осмысления в соответствии с накопленными новыми знаниями и существенно меняющимися топливно-сырьевыми условиями. Наряду с производительностью главными показателями эффективности становятся ресурс- и энергосбережение. Наблюдаются устойчивые тенденции к сокращению потребления природного газа, что с неизбежностью приводит к возобновлению работ по вдуванию коксового газа и, особенно, пылеугольного топлива. Развитие компьютерной техники и совершенствование математических методов позволяет разрабатывать все более сложные модели доменного процесса и совершенствовать системы мониторинга и контроля, что, в свою очередь, позволяет получать более точные представления о протекающих в доменной печи сложных физико-химических процессах.

В этот период в отделе впервые выполнен комплексный анализ современного уровня доменной плавки в печах разного объема и разработана технология использования альтернативных топливовосстановительных добавок с учетом уменьшения за-

трат кокса до технологически возможного значения 300–200 кг/т чугуна (В.И. Большаков, Н.А. Гладков, Н.М. Можаренко).

Создана отраслевая система анализа работы доменных печей на основе компьютерной обработки параметров работы доменных печей, расчета комплексных показателей доменной плавки и материально-тепловых балансов с оценкой погрешностей измерений и их дальнейшей корректировки. Проведен комплекс аналитических и экспериментальных исследований возможности организации бескоксового получения металла в шахтно-горновом агрегате (Товаровский И.Г.).

Разработаны положения концепции управления энергоресурсами в доменном производстве. Экономическая эффективность доменной плавки в значительной степени определяется ценой на энергоносители, поэтому анализ структуры энергопотребления доменного производства и поиски путей его совершенствования становятся все более актуальными (Н.М. Можаренко, А.В. Бородулин).

Разработана новая для теории доменного процесса система критериев, которые количественно определяют влияние качества и свойств железорудных материалов и кокса, параметров режимов загрузки шихтовых материалов, энергетического потенциала режима дутья, степени использования тепла в доменной печи, равномерности и интенсивности схода шихты на качество чугуна и эффективность доменной плавки (В.И. Большаков, Н.А. Гладков, Ф.М. Шутылев).

Разработаны теоретические положения процесса выплавки низкокремнистого чугуна. Опытные плавки, проведенные на крупнейшей доменной печи № 5 Череповецкого металлургического комбината (ЧерМК), показали экономию кокса 5–6 кг на тонну чугуна при снижении содержания кремния на 0,1 % (Н.М. Можаренко).

Дальнейшее развитие получила технология плавки на комбинированном дутье с вдуванием колошникового газа вместо природного, позволившая снизить расход условного топлива и обеспечить ровный ход плавки, за счет управления температурным уровнем (М.Т. Бузоверя, Н.М. Можаренко).

Были завершены разработки и проведены стендовые испытания новых технических решений по вдуванию в доменную печь продуктов газификации низкосортных углей. Испытания прифурменного реактора-газификатора пылеугольного топлива на стенде и на плавильном циклоне завода им. Петровского показали возможность стабильного получения восстановительного газа с температурой 1900–2000 °С. На комбинате «Запорожсталь» продолжались исследования по оптимизации параметров комбинированного дутья, использованию колошникового газа в качестве активатора горения и заменителя природного газа, освоению технологии работы доменных печей на низкокислотном агломерате.

Опираясь на серьезный научный фундамент и разработки предыдущих поколений, отдел металлургии чугуна по-прежнему является одним из ключевых

научных подразделений ИЧМ и проводит исследования в самых злободневных для металлургии Украины направлениях с учетом тенденций развития мирового доменного производства с целью повышения эффективности доменного производства, обеспечения высокого качества чугуна, оптимизации расходов сырья и топлива и повышения ресурса доменных печей за счет улучшения их эксплуатационной стойкости и совершенствования доменного производства на основе разработки эффективных ресурсо- и энергосберегающих технологий плавки.

Среди приоритетных направлений исследований, которые ведутся в отделе в настоящее время:

1. Системный анализ процессов и перспектив развития доменного производства в Украине. Специалистами отдела по заказу предприятий ГМК Украины разрабатываются рекомендации по повышению эффективности аглодоменного производства и снижению его ресурсо- и энергоемкости в существенно меняющихся в последнее время топливно-сырьевых условиях Украины. Сотрудники ОМЧ принимают участие в различных отраслевых совещаниях и конференциях, готовят аналитические справки и экспертные заключения по запросу органов государственной власти и металлургических холдингов.

2. Развитие научных представлений о физико-химических процессах, происходящих в доменной печи; разработка технологических предпосылок их стабильной работы в существующих топливно-сырьевых условиях, в стационарных и нестационарных условиях плавки (выдувка и задувка), технологическое сопровождение вывода доменных печей на нормальный устойчивый режим при глубоких расстройках их хода; разработка энергосберегающих технологий выплавки низкремнистых чугунов; развитие научных основ механизмов формирования устойчивого защитного гарнисажа.

3. Совершенствование технологии окомкования железорудного сырья и выплавки чугуна на основе управления металлургическими свойствами шихтовых материалов, в том числе с высоким содержанием вторичных ресурсов; разработка приемов оптимизации металлургической ценности шихты для обеспечения требуемого качества чугуна. Определение показателей спекания и качества окускованного материалов в исходном состоянии и при восстановительно-тепловой обработке, моделирование их поведения в процессе доменной плавки.

4. Развитие и реализация научно-практических основ технологии доменной плавки с использованием пылеугольного топлива. Научное обоснование и разработка технологических приемов эффективного применения ПУТ.

5. Развитие положений нетрадиционных малококсовых и бескоксовых технологий доменной плавки.

6. Разработка технологических мероприятий по продлению кампании доменной печи. Анализ причин и механизмов износа футеровки горна и лещади доменной печи, выдача рекомендаций по повышению их стойкости.

7. Разработка технологических решений по

улучшению экологического состояния на металлургических предприятиях Украины.

8. Разработка и внедрение систем автоматизированного контроля профиля, теплового состояния, разгара футеровки в шахте и горне, тепловых потерь и расхода кокса на их покрытие и расчетных теплогазодинамических моделей различных зон доменной печи. Получаемая с их помощью информация используется для обоснования и принятия стратегических решений и оперативных мер по выбору рациональных режимов плавки, обеспечивающих требуемый уровень производительности и экономичности в условиях применения технологии вдувания ПУТ при сохранении ресурса и обеспечении безаварийности эксплуатации доменной печи.

В условиях дефицита и удорожания качественного сырья и топлива, вовлечения в работу их новых видов, существенное изменение состава и свойств железорудного сырья (ЖРС) оказывает серьезное влияние на технологию доменной плавки, качество выплавляемого металла и ресурс работы доменных печей. Исследования по изучению металлургических свойств ЖРС и их влияния на параметры доменной плавки остаются одним из приоритетных научных направлений отдела.

Продолжаются работы по повышению эффективности вовлечения вторичных ресурсов в аглодоменное производство. Главными факторами, ограничивающими их использование, являются повышенное количество вредных элементов, пониженное содержание Fe в шихте и нестабильность ее химического состава, агрессивность расплавов по отношению к футеровке доменной печи и загромождение коксовой насадки из-за повышенной вязкости шлаков [14]. Несмотря на все эти отрицательные моменты, в последние годы степень их вовлечения в аглодоменное производство возрастает, поэтому в отделе разработан алгоритм оперативного определения их рационального состава и количества с учетом предельно допустимых норм содержания вредных элементов для получения чугуна заданного качества, который сводится к решению следующих задач:

– определение разности между предельно допустимым содержанием вредных и сопутствующих элементов в чугуне, которое задается техническими условиями, и их содержанием в минеральном сырье (кокс, окатыши, концентраты и аглоруды);

– оценка влияния расхода вторичных ресурсов на производительность доменных печей (учет снижения $Fe_{общ}$ в шихте за счет увеличения SiO_2);

– оценка влияния количества шлако-скраповой смеси на производительность аглопроизводства;

– разработка режимов загрузки железорудных материалов, исключающих контакт вторичных ресурсов с футеровкой доменной печи, и режимов промывки горна от флюсовых загромождений и коксового мусора.

С помощью высокотемпературной методики ИЧМ изучаются закономерности процессов, протекающих в аглошихте с повышенным содержанием техногенных отходов, что позволяет прогнозировать наиболее

перспективные способы их использования. Опыты по восстановлению и проплавке смесей конвертерного шлака с агломератом, окатышами и кусковой рудой в лабораторных условиях показали, что до температур 1450–1500 °С наличие конвертерного шлака в смеси способствует сохранению повышенного содержания FeO в первичном шлаковом расплаве (12–20 %). Содержание углерода в образовавшемся металлическом расплаве не превышает 1,8–2,2 % [15]. Попадание в горн доменной печи концентрированных масс малоуглеродистого расплава несет в себе основную угрозу для футеровки, для устранения которой разработаны приемы промывки горна от флюсовых трудно растворимых образований и коксового мусора за счет направленной концентрации смеси кусковой руды и конвертерного шлака в определенных зонах колошника при исключении сосредоточения агрессивных расплавов в пристеночной зоне доменной печи.

Изучены и проранжированы по эффективности более 10 видов составов материалов для промывок доменных печей от коксового мусора и флюсовых расплавов и определены рациональные составы промывочных подач.

Исследования показали, что одним из эффективных приемов повышения степени вовлечения вторичных ресурсов в аглодоменное производство является брикетирование. Реализация рекомендаций по замене части металлургических отходов гранулами, полученными путем окомкования отсева окатышей, шлама и колошниковой пыли, позволила в условиях одного из меткомбинатов Украины сократить вынос колошниковой пыли на 4,3 кг/т чугуна и уменьшить расход кокса на 4,6 кг/т чугуна. Использование гранулированной углеродсодержащей пыли при сохранении качества агломерата позволяет заменить до 20 % дефицитного аглотоплива, уменьшив расход традиционного агломерационного топлива в среднем на 8,8 кг/т чугуна [16].

В последние десятилетия в мировом доменном производстве наблюдается тенденция использования железорудного сырья с содержанием SiO₂ в шихте менее 5 %, поскольку одним из наиболее эффективных резервов сокращения затрат на выплавку чугуна является уменьшение выхода шлака. При переходе к малошлаковой технологии (выход шлака 200–240 кг/т чугуна) сокращается расход условного топлива. Содержание кремния в чугуне, как правило, не превышает 0,45 %.

Результаты проведенных ранее исследований перспективности реализации в условиях Украины комплексной технологии выплавки низкокремнистого чугуна и его использования в сталеплавильном производстве показали, что при уменьшении содержания кремния в чугуне на 0,1 % выход годного повышается на 0,20–0,24 %, расход кокса уменьшается на 5 кг/т чугуна, расход чугуна в кислородно-конвертерной плавке увеличивается на 5,4 кг/т стали, а лома сокращается на 8,5 кг/т стали.

Исследования свойств шлаковых и металлических расплавов в доменной плавке при использовании железорудных материалов с содержанием SiO₂ в

диапазонах 2,8–4,2 % показали, что происходит это, с одной стороны, за счет улучшения поведения низкокремнистого железорудного сырья в высокотемпературной зоне доменной печи, в частности, увеличения температуры полной потери газопроницаемости железорудного слоя (расширение сухой зоны), с другой – за счет снижения выхода шлака. Использование в железорудной части доменной шихты 30–35 % низкокремнистых окатышей позволяет снизить основность агломерата в среднем на 0,15 ед., что положительно отражается на стадии подготовки флюса к агломерационному процессу, повышает качество агломерата и устойчивость технологического процесса за счет того, что значения высокотемпературных свойств агломерата и окатышей выравниваются.

Однако переход на технологию малошлаковой плавки наряду с положительными моментами может привести к определенным проблемам:

- ухудшается устойчивость доменной плавки – за счет сокращения выхода шлака снижается теплосодержание расплава в горне доменной печи, что требует повышения качества кокса;

- усложняется самоочищение коксовой насадки из-за уменьшения количества первичного шлакового расплава и снижения содержания в нем FeO в среднем на 6–10 %, активизируются периферийные потоки расплава в горне;

- происходит качественное изменение гарнисажа в околофурменной зоне – снижение его толщины и увеличение рыхлости структуры.

Анализ результатов комплексных расчетно-аналитических, лабораторных и промышленных исследований по стабилизации теплового состояния низа доменной печи и предотвращению негативных последствий из-за ухудшения качества шихтовых материалов или нарушения работы оборудования позволили определить требования к качеству кокса. Для условий малошлаковой магнезиальной плавки показатель горячей прочности кокса (CSR) должен быть не ниже 55 %. Работа доменных печей с низким выходом шлака при нестабильном низком качестве кокса (CSR ≤ 50 %) вызывает необходимость поддерживать завышенные газодутьевые параметры, обеспечивающие температуры чугуна и шлака в пределах 1490–1520 °С и 1520–1580 °С соответственно и проводить профилактические промывки горна доменной печи от флюсовых добавок.

Один из самых перспективных путей уменьшения энергоемкости доменной плавки в настоящее время – технология вдувания пылеугольного топлива (ПУТ), позволяющая заменить природный газ более дешевыми смесями углей и существенно сократить расход кокса в доменном процессе. Однако при реализации этой технологии предприятия столкнулись с серьезными проблемами, приводящими к существенному уменьшению ресурса работы доменных печей. Для установления и устранения причин этих явлений сотрудниками ОМЧ проводятся комплексные исследования по разработке и научному обоснованию эффективных направлений подготовки и перехода доменных печей Украины к освоению технологии доменной плавки с ПУТ.

При реализации технологии ПУТ резко повышаются требования к качеству сырья и кокса. Несмотря на успехи в подготовке ПУТ к доменной плавке, совершенствование узлов ввода и технологии его сжигания, часть его в пределах фурменной зоны сгорает не полностью. Содержание углерода в частично сгоревшем топливе может оставаться на уровне 5–15 %, что совместно с золой пылеугольного топлива составляет 15–20 % от массы вдуваемой пыли. Основная часть несгоревшего пылеугольного топлива выносятся под вязко-пластичную зону (по сечению печи) в район среза фурменного очага, ухудшая дренажную способность горна [17].

Анализ поведения различных типов сырья показал, что переход от технологии доменной плавки с использованием природного газа (ПГ) на технологию с использованием ПУТ приводит к увеличению выхода шлака и частичному изменению его физико-химических свойств, в частности, значительно усиливается гетерогенность расплава. При вводе 4–7 % частично сгоревшего ПУТ вязкость промежуточных и конечных шлаков увеличивается на 8–15 %, повышая вероятность загромождения горна неплавкими массами, увеличивая приход щелочных элементов и серы и содержание оксида алюминия, что также ухудшает дренажные свойства расплава.

Высокотемпературные исследования поведения различных ЖРС в условиях работы доменных печей одного из предприятий холдинга «Метинвест» с использованием ПУТ в количестве 80–120 кг/т чугуна на стадии отработки технологии позволили разработать технологические рекомендации по улучшению качества агломерата (на основе определения рационального соотношения компонентов в аглошихте и замене части отходов гранулами), по регламенту загрузок марганецсодержащих материалов и мягких промывок доменных печей с помощью низкоосновного сырья. Их реализация позволила сократить количество сгоревших фурм, уменьшить расход кокса, снизить вынос колошниковой пыли и увеличить количество вдуваемого ПУТ без негативных последствий.

В ОМЧ разработаны и реализованы на доменных печах Украины системы автоматизированного контроля тепловых потерь и расхода кокса на их компенсацию, разгара футеровки и показателей тепловой работы доменных печей. Установлены закономерности изменения тепловых потерь, разрушения футеровки, образования гарнисажа, отклонений в тепловом режиме доменной печи в зависимости от конструкции ее системы охлаждения, свойств огнеупоров футеровки и технологии ведения доменной плавки [18].

Переход на технологию вдувания ПУТ приводит к серьезным изменениям не только в сырьевом, но и в энергетическом балансе предприятий. В лаборатории теплотехники и энергосберегающих технологий ОМЧ продолжает развиваться новое научное направление в области доменного производства – системная надежность, основной задачей которой является поиск формализованными методами и на основании опытных плавков компромиссных решений, обеспечи-

вающих требуемый объем выплавки чугуна заданного качества, минимальный расход энергетических ресурсов и высокую техническую надежность работы доменной печи и агрегатов ее обслуживающих при минимальном вредном воздействии на окружающую среду [19].

На основе анализа тепло-газодинамического режима работы доменных печей различного объема, работающих в различных дутьевых и шихтовых условиях, установлены закономерности и уточнен метод расчета тепло-газодинамической работы фурменной зоны доменной печи при вдувании в горн ПУТ на основании учета его химического состава. Определены закономерности кинетики горения ПУТ в фурменной зоне доменной печи и показано, что более полному сжиганию ПУТ способствует совместное вдувание природного газа и ПУТ. Обобщающим показателем стабильной тепло-газодинамической работы в рабочем пространстве печи является скорость газового потока, которая зависит от граничных условий – скорости дутья и газа при выходе из шихты. Определяющее воздействие на величину потерь давления в свободной от шихты области колошника оказывает отношение площади колошника к площади газоотводов и скорость газового потока при выходе из шихты [20].

Разработан метод расчета, позволяющий качественно и количественно оценивать время полного сгорания и перемещение от горелки угольной частицы в фурменном очаге при изменении дутьевых параметров (температура, расход и скорость дутья), параметров ПУТ (фракционный состав и содержание летучих) и расхода природного газа.

Жесткие требования к качеству чугуна, его химсоставу и температуре предъявляет сталеплавильное производство. Сотрудниками лаборатории теплотехники и энергосберегающих технологий отдела металлургии чугуна совместно со специалистами отдела металлургии стали ИЧМ разработан и реализован метод расчета полного энергетического баланса производства стали в технологическом комплексе «доменный цех – кислородно-конвертерный цех», включающий материальный, тепловой и эксергетический балансы на основе совместного взаимосвязанного учета материальных, теплоэнергетических и эксергетических потоков в доменной печи и кислородном конвертере при вдувании ПУТ различного химического состава [21].

Определены закономерности влияния содержания кремния в чугуне и его температуры на распределение эксергетических потоков и экологических показателей в системе «доменная печь – кислородный конвертер». Установлено, что уменьшение содержания кремния в чугуне на 0,1 % (не вызывающее расстройств тепловой работы печи), положительно влияет на энергоемкость и экологические показатели производства стали, при этом уменьшаются затраты подводимой эксергии и суммарных потерь эксергии, увеличивается эксергетический и технологический коэффициент полезного действия (КПД), уменьшается показатель ресурсоемкости и увеличивается коэффициент экологичности. А увеличение

температуры чугуна в доменной печи на 30 °С приводит к уменьшению затрат подводимой эксергии и суммарных потерь эксергии. Рациональная технология применения ПУТ, уменьшение содержания кремния в чугуне и увеличение его температуры позволяет увеличивать эксергетические КПД, уменьшать эксергетические потери и улучшать экологические показатели.

Уточнены закономерности, обоснована целесообразность и дана количественная оценка влияния предварительного подогрева ПУТ перед его подачей в доменную печь и вдувания пылевидных окислов железа на показатели тепловой работы печи. Предложены рациональные режимы совместного вдувания в горн доменных печей предварительно нагретого до 400 °С ПУТ, пылевидных окислов железа (до 250 кг/т чугуна) и кислорода (до ~50 %), которые позволяют на каждые 100 °С увеличения температуры ПУТ увеличить производительность печи на 0,3–3 %, уменьшить расход кокса на 0–3 %, увеличить выход вторичных энергетических ресурсов на ~1–3 %, увеличить эксергетические КПД на 0,3–0,7 %, улучшить экологические показатели до 0,7 %.

Уточнены закономерности и дана количественная оценка применения ПУТ и природного газа при отдельном и совместном вдувании в доменную печь. Применение ПУТ и природного газа (140–160 кг/т чугуна и 40 м³/т чугуна), по сравнению с применением только ПУТ (160 кг/т чугуна) приводит к уменьшению тепловых потерь (на 15–30 %), расхода кокса (на 5–10 %), уменьшению финансовых затрат на топливо (до 4\$/т чугуна), увеличению выхода вторичных энергетических ресурсов (ВЭР) (на 10–15 %) и увеличению затрат подводимой эксергии в системе «доменный – кислородно-конвертерный цех» на ~0,4 ГДж/т стали (эквивалентно 12 кг у.т./т стали).

Комплексный анализ причин уменьшения ресурса работы шахты доменных печей традиционной конструкции при расходе ПУТ более 120 кг/т чугуна позволил разработать эффективные направления увеличения ресурса работы шахты доменных печей (ДП) с применением 160 кг/т ПУТ и более, включающий:

- изменение конструкции и профиля печи за счет увеличения диаметра распара и его высоты, уменьшение угла наклона заплечиков;
- использование химически очищенной воды в системе охлаждения;
- использование медных и других холодильников с высокой теплоотводящей способностью в заплечиках и шахте;
- применение бесконусных загрузочных устройств для формирования осевого распределения газового потока;
- использование для приготовления ПУТ углей с минимальным содержанием золы;
- выбор рациональных дутьевого, газодинамического и шлакового режимов загрузки печи.

Реализация современной конструкции профиля печи, модернизация и совершенствование средств контроля и управления радиальным распределением, восстановительной и тепловой работой газового

потока и сжигания ПУТ, установка автоматизированных систем контроля за тепловой работой и разгаром футеровки шахты позволили разработать и реализовать рекомендации по обеспечению рационального высокопроизводительного, ресурсо- и энергосберегающего рационального режима работы для доменных печей № 3 ПАО «Запорожсталь» и № 3 ЧАО «МК «Азовсталь» с вдуванием ПУТ 160–180 кг/т чугуна [22].

Результаты расчетов эксергетического баланса для оценки показателей работы доменных печей Украины с применением ПУТ до 160 кг/т чугуна позволили оценить влияние вредных выбросов на окружающую среду и показатели ресурсоемкости и экологичности процесса, которые определяют затраты энергии, воды, воздуха, земельных и других природных ресурсов на единицу полезной продукции и отношение чистого полезного эффекта.

Продолжаются исследования в области теории и технологии доменного процесса. Разработанная в ИЧМ многозонная модель хода процессов в объеме печи предназначена для создания возможности количественного анализа процессов доменной плавки в радиальных кольцевых сечениях по высоте печи при заданном распределении материалов на колошнике и позволяет прогнозировать показатели плавки с раскрытием состояния процессов по высоте и поперечному сечению печи.

Разработка мероприятий и технологических решений, обеспечивающих безаварийную работу оборудования, продление кампании ДП, особенно при вдувании ПУТ, по-прежнему остается одним из приоритетных направлений деятельности ОМЧ. Рекомендации и технологические мероприятия по задувке доменных печей, разработанные специалистами отдела совместно с производителями одного из украинских предприятий, способствовали безаварийному выводу его печей на заданные планово-экономические показатели при обеспечении сохранения огнеупорной футеровки, конструкций и оборудования после длительной остановки (более 45 суток).

Для условий текущего производства ОАО «Днепропетровский металлургический комбинат» («ДМК») на основании результатов исследований влияния восстановительно-тепловой обработки на формирование жидких фаз из смесей окатышей, агломерата и кусковых руд, разработан режим загрузки шихтовых материалов, обеспечивающих мягкую промывку поверхности коксовой насадки от флюсовых остатков в области не полностью сгоревших частиц ПУТ. Реализованные на комбинате технологические приемы и рекомендации и их техническое сопровождение позволили в 2018 г. сократить расход условного топлива на 2–7 кг/т чугуна [23].

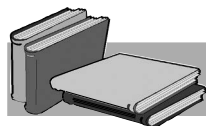
Отличительной особенностью научных исследований ОМЧ является их комплексный характер с учетом всех аспектов доменного производства. Работы выполняются совместно специалистами разных направлений – агломератчиками, доменщиками, механиками, теплотехниками, автоматчиками, физикохимиками. Под руководством академика

В.И. Большакова разработаны и внедрены новые режимы управления технологическими процессами доменного производства, программа модернизации доменных печей большого объема с оснащением их современными бесконусными загрузочными устройствами и новыми системами автоматизированного контроля и управления, реализующие комплексный подход к совершенствованию технологии доменной плавки [24].

Совместно со специалистами отдела физико-химических проблем проводятся комплексные исследования закономерностей процессов, протекающих в объеме доменной печи, направленные на совершенствование шлакового режима, свойств ЖРС и чугуна и др. Со специалистами отдела технологического оборудования ведутся работы по созданию и реализации модельной системы для поддержки принятия решений по выбору и корректировке программ загрузки доменной печи, оборудованной современным бесконусным загрузочным устройством. Новый подход к выбору энергоэффективных режимов загрузки при использовании многокомпонентной шихты переменного качества в переходных дутьевых режимах позволяет обеспечить эксплуатационную устойчивость системы охлаждения и безаварийную работу доменной печи. Результаты использования информации о распределении температур газов в колошниковом пространстве, влиянии технологиче-

ских факторов на характер изменения температур футеровки по высоте печи и формирование защитного гарнисажа позволяют принимать научно обоснованные решения по управлению загрузкой печи шихтовых материалов, способствующие повышению ее эксплуатационной стойкости [25].

Для современного аглодоменного производства Украины первостепенное значение приобретает необходимость оперативно и адекватно реагировать на изменяющиеся и нестабильные топливно-сырьевые условия, производить качественную и конкурентоспособную продукцию и не допускать аварийных ситуаций. Выполнение этих задач невозможно без инновационных научных разработок, учитывающих как тенденции развития мирового доменного производства, так и местную специфику. Постоянное внимание к развитию фундаментальной теории доменного процесса, прочные связи с предприятиями горно-металлургического комплекса, тесное сотрудничество с научно-исследовательскими и проектными организациями НАН Украины и отрасли, творческий потенциал и опыт сотрудников позволяют коллективу ОМЧ вносить достойный вклад в развитие металлургической науки, создание новых технологий и освоение новой техники.

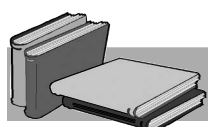


ЛИТЕРАТУРА

1. *Большаков В.И.* Выдающийся доменщик, академик Максим Власович Луговцов – основатель ИЧМ. *Сборник научных трудов «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии»*. 2004. Вып. 9. С. 26–33.
2. *Можаренко Н.М.* Развитие творческого наследия З.И. Некрасова в Институте черной металлургии. *Сборник научных трудов «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии»*. 2008. Вып. 16. С. 440–445.
3. *Некрасов З.И., Покрышкин В.Л.* О результатах освоения крупных доменных печей. Основные направления технологического процесса доменного производства. *Бюллетень ЦНИИ ТЭ ЧМ*. 1974. № 11 (727). С. 7.
4. *Улахович В.А., Можаренко Н.М., Нетронин В.И.* Раздувка мощной доменной печи объемом 5500. *Сталь*. 1988. № 1. С. 15–23.
5. *Гладков Н.А., Ульянов А.Г.* Об использовании табачных руд Керченского месторождения. *Металлургия*. 1960. № 2. С. 3–4.
6. *Некрасов З.И.* Эффективность применения комбинированного дутья высоких параметров. *Сталь*. 1977. № 10. С. 880–883.
7. *Некрасов З.И., Юпко Л.Д., Покрышкин В.Л.* Освоение технологии плавки с вдуванием пылевидного топлива совместно с применением природного газа и обогащенного кислородом дутья на доменной печи завода «Запорожсталь». *Металлургия чугуна: Тематический отраслевой сборник*. М.: Металлургия. 1973. № 1. С. 98–110.
8. *Некрасов З.И., Маймур Б.Н., Мороз В.Ф.* Изучение теплофизических характеристик железорудных брикетов в процессе нагрева и восстановления в различных температурно-газовых условиях. *Тематический отраслевой сборник «Вопросы производства чугуна в доменных печах»*. М: Металлургия, 1984. С. 7–12.
9. *Большаков В.И.* Доменное производство «Криворожстали»: монография. Днепропетровск, 2004. 378 с.
10. *Бородулин А.В., Горбунов А.Д., Романенко В.И.* Домна в энергетическом измерении: монография. Днепропетровск: Издательство ДГТУ, 2005. 480 с.
11. *Товаровский И.Г.* Познание процессов и развитие технологии доменной плавки. Днепропетровск: Журфонд, 2015. 912 с.
12. *Гладков Н.А., Нестеров А.С.* Процессы в слое железорудных материалов при его нагревании. *Металлы*. 1987. № 3. С. 9–11.

13. *Большаков В.И., Голубых Г.Н., Можаренко Н.М.* Промышленная безопасность доменных печей при задувке и выдувке. *Сборник научных трудов «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии»*. 2007. Вып. 14. С. 209–309.
14. *Большаков В.И., Нестеров А.С., Коваленко А.Г.* Эффективная работа аглодоменного производства ПАО ЕМЗ при расширении использования в шихте вторичных ресурсов и окатышей. *Сталь*. 2014. № 11. С. 7–9.
15. *Нестеров А.С., Гармаш Л.И., Лопатенко К.П.* Исследования высокотемпературных свойств железорудных материалов в лабораторных условиях. *Сборник научных трудов «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии»*. 2018. Вып. 32. С. 64–79.
16. *Нестеров А.С., Гармаш Л.И., Пивненко А.В.* К вопросу о совершенствовании подготовки железорудного сырья к доменной плавке. *Сборник научных трудов «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии»*. 2014. Вып. 29. С. 64–71.
17. *Нестеров А.С., Семенов Ю.С., Горупаха В.В.* Исследование процесса формирования жидких фаз при вдувании ПУТ в переменных шихтовых условиях. *Металлургия чугуна – вызовы XXI века: труды VIII Международного конгресса доменщиков*. Москва, 2017. С. 133–137.
18. *Чайка А.Л., Лебедь В.В., Сохацкий А.А.* Опыт и перспективы комплексного применения систем автоматизированного контроля разгара футеровки, тепловых потерь и теплоэнергетических параметров на доменных печах. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2017. № 3. С. 2–9.
19. *Большаков В.И., Чайка А.Л., Лебедь В.В.* Системная надежность доменного производства с использованием пылеугольного топлива. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2015. № 7. С. 22–30.
20. *Чайка А.Л., Корнилов Б.В., Лебедь В.В.* Исследование распределения скоростей газового потока по высоте доменной печи и их влияние на устойчивость газодинамического режима. *Сталь*. 2019. № 1. С. 2–4.
21. *Чайка А.Л., Чернятевич А.Г., Сохацкий А.А.* Эксергетический анализ влияния содержания кремния в чугуне и его температуры на энергоэффективность работы комплекса «доменный – кислородно-конвертерный цех». *Черная металлургия: Бюл. ин-та «Черметинформация»*. 2019. № 2. С. 189–197.
22. *Gordon Y., Sadri A., Izumskiy N.* Integration of lining and cooling system diagnostics methods into the expert system to reduce hot metal production cost and increase blast furnace productivity. Philadelphia Association for Iron & Steel Technology. Pennsylvania Convention Center. 2018. URL: <http://digital.library.aist.org/pages/PR-374-186.htm>
23. *Можаренко Н.М., Семенов Ю.С., Горупаха В.В.* Особенности технологии доменной плавки с применением пылеугольного топлива. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2017. № 5. С. 2–9.
24. *Большаков В.И., Семенов Ю.С., Шумельчик Е.И.* Освоение режимов загрузки доменной печи, оборудованной БЗУ, в условиях нестабильного качества шихтовых материалов. *Сборник трудов VI Международного Конгресса по аглококсо-доменному производству*. Москва, 2013. С. 60–71.
25. *Семенов Ю.С., Шумельчик Е.И., Горупаха В.В.* Діагностика та управління доменною плавкою в змінних паливно-сировинних умовах. Дніпро: Домінанта Прінт, 2018. 260 с.

Поступила 24.09.2019



REFERENCES

1. *Bol'shakov, V.I.* (2004). Prominent blastfurnace operator, Academician Maxim Vlasovich Lugovtsov – Founder of the ISI. *Sbornik nauchnykh trudov "Fundamental'nye i prikladnye problemy chernoy metallurgii". Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, no. 9, pp. 26–33 [in Russian].
2. *Mozharenko, N.M.* (2008). Development of the creative heritage of Z.I. Nekrasov in ISI. *Sbornik nauchnykh trudov "Fundamental'nye i prikladnye problemy chernoy metallurgii". Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, no. 16, pp. 440–445 [in Russian].
3. *Nekrasov, Z.I., Pokryshkin, V.L.* (1974). The results of the development of large blast furnaces. *Osnovnye napravleniya tekhnologicheskogo protsessa domennogo proizvodstva. Biulleten' TSNII TE ChM. The main directions of the technological process of blast furnace production*, no. 11 (727), p. 7 [in Russian].
4. *Ulahovich, V.A., Mozharenko, N.M., Netronin, V.I.* (1988). Blowing up a powerful 5500 blast furnace. *Stal'. Steel*, no. 1, pp. 15–23 [in Russian].
5. *Gladkov, N.A., Ul'janov, A.G.* (1960). About the use of tobacco ores of the Kerch field. *Metallurg. Metallurgist*, no. 2, pp. 3–4 [in Russian].
6. *Nekrasov, Z.I.* (1977). The effectiveness of the use of combined blasting of high parameters. *Stal'. Steel*, no. 10, pp. 880–883 [in Russian].
7. *Nekrasov, Z.I., Yupko, L.D., Pokryshkin, V.L.* (1973). The development of melting technology with the injection of pulverized fuel together with the use of natural gas and oxygenrich blast in a blast furnace of the "Zaporizhstal". *Metallurgiya chuguna: Tematicheskij otraslevoi sbornik. Cast iron metallurgy*, no. 1, pp. 98–110 [in Russian].

8. Nekrasov, Z.I., Majmur, B.N., Moroz, V.F. (1984). Studying the thermophysical characteristics of iron ore briquettes during heating and recovery in various temperature-gas conditions. *Tematicheskij otraslevoj sbornik "Voprosy proizvodstva chuguna v domennykh pechakh". Issues of the production of cast iron in blast furnaces*, pp. 7–12 [in Russian].
9. Bol'shakov, V.I. (2004). Blastfurnace production of Krivorozhstal. Dnepropetrovsk, 378 p. [in Russian].
10. Borodulin, A.V., Gorbunov, A.D., Romanenko, V.I. (2005). Blast furnace in the energy dimension. Dneprodzerzhinsk: DGTU, 480 p. [in Russian].
11. Tovarovskij, I.G. (2015). Knowledge of processes and the development of blast furnace technology. Dnepropetrovsk: Zhurfond, 912 p. [in Russian].
12. Gladkov, N.A., Nesterov, A.S. (1987). Processes in a layer of iron ore materials when it is heated. *Metally. Metals*, no. 3, pp. 9–11 [in Russian].
13. Bol'shakov, V.I., Golubyh, G.N., Mozharensko, N.M. (2007). Industrial safety of blast furnaces for blowing and expulsion. *Sbornik nauchnykh trudov "Fundamental'nye i prikladnye problemy chernoj metallurgii". Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, no. 14, pp. 209–309 [in Russian].
14. Bol'shakov, V.I., Nesterov, A.S., Kovalenko, A.G. (2014). Efficient operation of sinter plant production at EMP while expanding the use of secondary resources and pellets in the charge. *Stal'. Steel*, no. 11, pp. 7–9 [in Russian].
15. Nesterov, A.S., Garmash, L.I., Lopatenko, K.P. (2018). Studies of the hightemperature properties of iron ore materials in laboratory conditions. *Sbornik nauchnykh trudov "Fundamental'nye i prikladnye problemy chernoj metallurgii". Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, no. 32, pp. 64–79 [in Russian].
16. Nesterov, A.S., Garmash L.I., Pivnenko, A.V. (2014). The issue of improving the preparation of iron ore for blast furnace smelting. *Sbornik nauchnykh trudov "Fundamental'nye i prikladnye problemy chernoj metallurgii". Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, no. 29, pp. 64–71 [in Russian].
17. Nesterov, A.S., Semenov, Yu.S., Gorupaha V.V. (2017). Investigation of the process of formation of liquid phases during injection of pulverized coal in variable charge conditions. *Metallurgija chuguna – vyzovy XXI veka: trudy VIII Mezhdunarodnogo kongressa domenchshnikov. Cast Iron Metallurgy – Challenges of the 21st Century: VIII International Congress*, Moscow, pp. 133–137 [in Russian].
18. Chajka, A.L., Lebed', V.V., Sohackij, A.A. (2017). Experience and prospects for the integrated use of systems for automated control of the height of the lining, heat loss and heat energy parameters on blast furnaces. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'. Metallurgical and Mining Industry*, no. 3, pp. 2–9 [in Russian].
19. Bol'shakov, V.I., Chajka, A.L., Lebed', V.V. (2015). System reliability of pulverized coal blast furnace production. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'. Metallurgical and Mining Industry*, no. 7, pp. 22–30 [in Russian].
20. Chajka, A.L., Kornilov, B.V., Lebed', V.V. (2019). Investigation of the distribution of gas flow velocities over the height of the blast furnace and their influence on the stability of the gasdynamic regime. *Stal'. Steel*, no. 1, pp. 2–4 [in Russian].
21. Chajka, A.L., Chernjatevich, A.G., Sohatskij, A.A. (2019). Exergy analysis of the influence of silicon content in cast iron and its temperature on the energy efficiency of the complex "blast furnace – oxygenconverter workshop". *Chernaya metallurgiya: Biul. in-ta "Chermetinformacija". Ferrous metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economical Information*, no. 2, pp. 189–197 [in Russian].
22. Gordon, Y., Sadri, A., Izumskiy, N. (2018). Integration of lining and cooling system diagnostics methods into the expert system to reduce hot metal production cost and increase blast furnace productivity. Philadelphia Association for Iron & Steel Technology. Pennsylvania Convention Center. 2018. URL: <http://digital.library.aist.org/pages/PR-374-186.htm> [in English].
23. Mozharensko, N.M., Semenov, Yu.S., Gorupaha, V.V. (2017). Features of pulverized coal blast furnace technology. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'. Metallurgical and Mining Industry*, no. 5, pp. 2–9 [in Russian].
24. Bol'shakov, V.I., Semenov, Yu.S., Shumel'chik, E.I. (2013). Mastering the loading modes of a blast furnace equipped with a BZU in conditions of unstable quality of charge materials. *Sbornik trudov VI Mezhdunarodnogo Kongressa po aglokoksodomennomu proizvodstvu: Moskva. Collection of works of the VI International Congress on sinter production: Moscow*, pp. 60–71 [in Russian].
25. Semenov, Yu.S., Shumel'chik, E.I., Gorupaha, V.V. (2018). Diagnostics and control of blast-furnace smelting in changing fuel and raw materials conditions. Dnipro: Dominanta Print, 260 p. [in Ukrainian].

Received 24.09.2019

О.С. Нестеров, канд. техн. наук, ст. наук. співр., зав. відділу,
e-mail: asn.dnepr@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0183-0327>;
О.Л. Чайка, канд. техн. наук, ст. наук. співр., зав. лаб., e-mail:
chaykadp@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-1678-2580>; **Л.І. Гармаш**,
канд. техн. наук, ст. наук. співр., e-mail: larysagar@gmail.com,
<https://orcid.org/0000-0002-6873-6685>

*Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України (Дніпро,
Україна)*

Відділ металургії чавуну Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України. Історія і сучасність

У статті представлено пріоритетні напрямки досліджень і основні наукові досягнення відділу металургії чавуну (ВМЧ) Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України (ІЧМ) починаючи з моменту його заснування і до теперішнього часу.

Засновником ВМЧ був академік Михайло Власович Луговцов. За допомогою розробленої ним статистичної теорії доменного процесу на основі положень теорії теплового потоку, методів математики, механіки і фізичної хімії було кількісно описано процеси доменної плавки.

Великий внесок у розвиток теорії і практики доменного виробництва вніс академік Зот Ілліч Некрасов. Напрямки інтенсифікації доменного процесу за рахунок використання природного газу, комбінованого дуття і вдування пиловугільного палива (ПВП), обґрунтування можливостей і будівництво доменних печей великого об'єму, вдосконалення сировинної бази доменного виробництва визначили шляхи розвитку галузі на багато десятиліть і не втратили актуальності і зараз.

Завдяки Зоту Іллічу в ІЧМ для проведення досліджень було створено прекрасну лабораторну базу, яка в той час не поступалася кращим світовим. Доменщики ВМЧ працювали на всіх найбільших металургійних підприємствах СРСР і внесли великий вклад в розвиток багатьох напрямків доменного виробництва. Результати проведених у відділі робіт були базою для розробки нових технологій і матеріалів та сприяли зміцненню авторитету радянської металургії в світі. У статті перераховано найбільш значущі розробки наукових співробітників ВМЧ в радянський період.

Дослідження, які виконуються у відділі нині, розвивають і розширюють ці напрямки з урахуванням вимог до якості кінцевого продукту і сучасних паливно-сировинних умов, в яких працює металургія України. На основі системного аналізу процесів і перспектив розвитку доменного виробництва фахівцями відділу розробляються рекомендації щодо підвищення його ефективності та зниження ресурсо- і енергоємності. Особлива увага приділяється питанням подовження кампанії доменних печей, розробці технологій їх стабільної роботи в стаціонарних і нестаціонарних умовах плавки, вдосконалення технології огрудкування залізорудної сировини і виплавки чавуну на основі управління металургійними властивостями шихтових матеріалів, в тому числі, з високим вмістом вторинних ресурсів, розвитку і реалізації науково-практичних основ технології ефективного застосування ПВП.

Ключові слова

Доменний процес, комбіноване дуття, технологія доменної плавки, доменні печі великого об'єму, вдування пиловугільного палива, якість залізорудної сировини, подовження кампанії доменної печі.

Summary

A.S. Nesterov, PhD (Engin.), Senior Researcher, Head of the Department, e-mail: asn.dnepr@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0183-0327>;
A.L. Chaika, PhD (Engin.), Senior Researcher, Head of the Laboratory, e-mail: chaykadb@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-1678-2580>;
L.I. Garmash, PhD (Engin.), Senior Researcher, e-mail: larysagar@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6873-6685>

Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov of the NAS of Ukraine (Dnipro, Ukraine)

Department of Cast Iron Metallurgy of Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov of the NAS of Ukraine. History and Modernity

The article presents the main scientific achievements and research priorities of the Department of Cast Iron Metallurgy (DCIM) of the Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov of the NAS of Ukraine (ISI) from its inception to the present.

The founder of the DCIM was Academician Mikhail Vlasovich Lugovtsov. He developed the statistical theory of the domain process that based on the principles of the theory of heat flow, methods of mathematics, mechanics, and physical chemistry. This theory described quantitatively the processes of domain melting.

Academician Zot Ilyich Nekrasov made a great contribution to the development of the theory and practice of domain production. Directions of intensification of the domain process through the use of natural gas, combined blasting and injection of pulverized coal (PC) into a blast furnace, substantiating the possibilities and building largescale blast furnaces, improving the raw material base of blast furnace production have determined the development of the industry for many decades and have not lost their relevance even now.

Thanks to Zot Ilyich, an excellent laboratory base was created in the ISI for research, which was not inferior to the best world ones at that time. DCIM domain workers worked at all the largest metallurgical enterprises of the USSR and made a great contribution to the development of many areas of blast furnace production. The results of this work were the basis for the development of new technologies and materials and contributed to strengthening the authority of Soviet metallurgy in the world. The article lists the most significant developments of DCIM scientists in the Soviet period.

The research results, which are performed in the division today, develop and expand these areas, taking into account the requirements for the quality of the final product and modern fuel and raw materials conditions in which the metallurgy of Ukraine operates. Specialists of the department develop recommendations to increase its efficiency and reduce resource and energy intensity based on a systematic analysis of the processes and prospects for the development of blast furnace production. Particular attention is paid to the extension of the blast furnace campaign, the development of technologies for their stable operation in stationary and non-stationary melting conditions, the improvement of the technology of pelletizing iron ore and coast iron smelting based on the management of metallurgical properties of charge materials, including those with a high content of secondary resources, development and implementation scientific and practical foundations of technology for the effective application of PC.

Keywords

Blast furnace process, combined blowing, blast furnace technology, large blast furnaces, pulverized coal injection, iron ore quality, blast furnace campaign extension.

адреса редакції та друкарні

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