К. т. н. **Л. М. Аксельрод** (✉)

ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия

УДК 666.76.001.8+669]:338.1

ПЕРСПЕКТИВА ОБЕСПЕЧЕНИЯ МЕТАЛЛУРГИИ ОГНЕУПОРАМИ В 2022 г. И КЛЮЧЕВЫЕ ФАКТОРЫ РАЗВИТИЯ НА БЛИЖАЙШЕЕ БУДУЩЕЕ. Часть 1. Результаты 2021 г.

Проанализированы направления развития практики, организационных и технологических аспектов в огнеупорной отрасли в 2021 г., а также перспективы реализации современных подходов для повышения эффективности использования огнеупорных материалов в металлургии. Сделан прогноз развития направлений в отрасли под влиянием сложившейся многофакторной ситуации со снижением объемов производства рядовых огнеупорных материалов, возрастанием роли огнеупоров основного состава высокого качества, неформованных огнеупорных материалов и совершенствования технологии использования огнеупоров в решении задач, обновляемых заказчиками. Обсуждаются основные направления развития огнеупорного производства: консолидация бизнеса, развитие исследовательских структур, перемещение производственных мощностей к производственным площадкам предприятий — потребителей продукции. Остается актуальным повышение роли огнеупорных материалов в решении задач, определяемых требованиями заказчика: «чистая сталь», энергоэффективность и снижение эмиссии CO_2, удельных расходов и повышение стойкости футеровки металлургических агрегатов.

Ключевые слова: *огнеупоры, чистая сталь, энергоэффективность, эмиссия CO_2, удельный расход огнеупоров, стойкость футеровки.*

ВВЕДЕНИЕ

Огнеупорные материалы — сложные композиты, способные противостоять одновременному агрессивному воздействию разных факторов как химического, так и термомеханического характера. Поставщики огнеупоров предлагают комплексные инженерные решения с учетом изменяющихся требований заказчиков. Снижается удельный расход огнеупорных материалов как следствие ускорения прогресса в технологии их изготовления и совершенствования технологии применения. С другой стороны, растут удельные затраты на применяемые огнеупоры для обновляемых технологий металлургического производства, включая применение сырья нового качества, изменяющиеся цены на сырье, энергоносители и т. д. В этих условиях усиливается конкуренция между изготовителями (поставщиками) и инжиниринговыми структурами в поиске путей удовлетворения растущих запросов потребителей. Создаются новые и модернизируются существующие технологии изготовления и применения огнеупорных материалов. Основными факторами развития огнеупорной индустрии по-прежнему остаются черная металлургия, потребляющая до 70 % производимых огнеупоров, и Китай, как основной производитель, потребитель и экспортер огнеупоров. Рассматривая в комплексе тенденции и направления развития отрасли в мире, можно оценить перспективы обеспечения огнеупорами черной металлургии, а также определить роль отечественной огнеупорной отрасли.

✉

Л. М. Аксельрод
E-mail: axelrodlev@yandex.ru

Согласно данным World Steel Association (WSA, wordsteel) в 2021 г. производство стали выросло на 3,7 % (до 1950,5 млн т) по отношению к 2020 г., когда прирост составил 0,1 %. В 2022 г. рост производства стали продолжится на 2,2 % (до 1896,4 млн т). С середины 2021 г. в Китае происходит снижение производства стали (рис. 1), в ноябре 2021 г. на 22 % в сравнении с ноябрем 2020 г., но уже в декабре производство стали в КНР начало расти. При этом производство стали в иных государствах (в частности, в России) весь этот период продолжает расти, частично компенсируя существенный спад в Китае после мощного импульса восстановления роста объема производства черных металлов в 2020 г.

Удельный расход огнеупоров в металлургии

Период, гг.	Государство	Снижение удельного расхода за период, кг/т стали	Удельный расход к концу периода, кг/т стали
2008–2014	Европа, Япония, США	1	7–10
2008–2014	Китай	3	20
2015–2020	Европа, Япония, США	0,1–0,5	7–9
2015–2020	Россия	1–2	9–11
2015–2020	Китай	5	12–15
2020–2025 (прогноз)	Китай	5	7–11

и в первом–втором квартале 2021 г. Снижение производства стали в КНР в 2021 г. составило 35 млн т (до 1033 млн т) при производстве 1065 млн т в 2020 г. Наблюдается одновременно и снижение производства цемента в Китае, второй в мире отрасли по объему потребления огнеупоров. Производство цемента в 2021 г. в Китае сократилось на 1,2 %, достигнув 2363 млн т.

Согласно прогнозу Roskill, в период 2020–2030 гг. спрос на огнеупоры в мире вырастет на 0,7 %, при этом спрос на периклазосодержащие огнеупоры будет расти на 1,2 % в год. Следует отметить, что рост потребления огнеупоров, например, в цветной металлургии, нефтехимической промышленности, в производстве стекла и т. д. в КНР продолжается.

Падение объема производства стали и цемента в КНР с середины 2021 г. носит плановый характер и осуществляется на фоне снижения объемов строительства, ужесточения требований экологического характера, решения задач регулирования расхода электроэнергии и природного газа в отопительный сезон. И несмотря на продолжающееся наращивание объема производства в иных отраслях – потребителях огнеупоров, запланированное [1] снижение удельного расхода огнеупорных материалов в металлургии (см. таблицу) при отсутствии компенсирующего роста производства в этой отрасли оказывает прямое влияние на уменьшение объема потребления огнеупорных материалов в Китае с перспективой расширения экспортной направленности отрасли.

Оценка потребления огнеупорных материалов в мире, а также относительная стабильность в потреблении плавленого и спеченного периклаза в период 2010–2020 гг. (рис. 2) подтверждает тенденцию снижения.

В то же время в 2022 г. ожидается восстановление тенденции роста объема производства стали в Китае с уклоном в производство высококачественных марок стали.

ИТОГИ РАЗВИТИЯ ОГНЕУПОРНОЙ ИНДУСТРИИ В 2020–2021 гг.

Последние годы мировой рынок огнеупоров устойчиво определился как рынок потребителя на фоне жесткой конкуренции поставщиков между собой при наличии проблем с регулярностью поставок огнеупоров. Перечисленные ниже тенденции получили развитие в последнее десятилетие, причем ряд направлений перешли в целевую отраслевую политику международного характера.

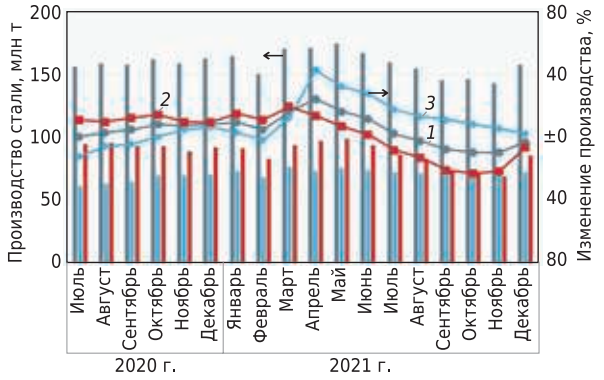

Рис. 1. Производство стали в мире (*1*, ■) и в Китае (*2*, ■) за июль 2020 г. – декабрь 2021 г. и изменение производства 2021 г. к 2020 г. (*3*, ■ — мир без Китая)

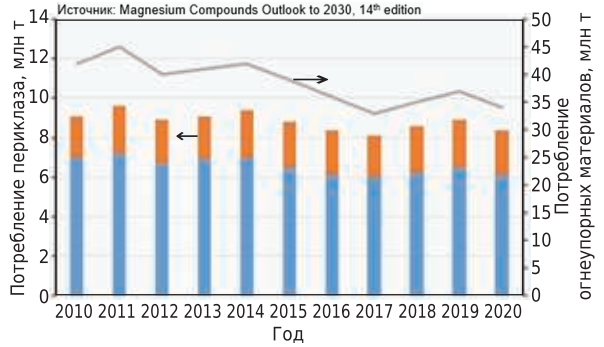

Рис. 2. Потребление плавленого (FM ■) и спеченного (DBM ■) периклаза, а также огнеупорных материалов в мире в 2010–2020 гг.

■ Процесс консолидации и оптимизации бизнеса в огнеупорной индустрии развивается стабильно. Появляются новые варианты поглощения и сотрудничества между производителями огнеупоров с вовлечением инжиниринговых структур, а также с предприятиями – потребителями соответствующих услуг.

В настоящее время реализуется государственная практика консолидации в разных отраслях в КНР: и в производстве огнеупоров, которое по объему составляет 2/3 производства огнеупорных материалов в мире, и в отраслях

– потребителях огнеупорных материалов. Крупнейшим производителем стали в мире является созданная в 2016 г. фирма China Baowu Steel Group Corp. Ltd с объемом производства 115,29 млн т стали в 2020 г., которая реорганизовала ряд крупных металлургических предприятий с вовлечением в единую структуру. Только за два последних года в состав фирмы вошли Maanshan Iron & Steel Group, Taiyuan Iron & Steel (TISCO) и Chongqing Iron & Steel общей мощностью 35 млн т, а также основные предприятия Sinosteel Group Kunming Iron & Steel Holdings. На третье место в мире вышла также китайская фирма Ansteel Group Corp., объединившаяся с Ben Gang Group Corp., с суммарным объемом производства 63 млн т стали, на втором месте находится прежний многолетний лидер фирма ArcelorMittal (Люксембург) производительностью более 78 млн т стали. Цель данных процессов консолидации — повышение конкурентоспособности на рынке, оптимизация производственных процессов и одновременно концентрация в головной фирме вопросов приобретения огнеупорных материалов и оценки эффективности их применения на производственных площадках.

До настоящего времени в Китае насчитывалось более 2000 предприятий – производителей огнеупорных материалов разного масштаба. По мнению Китайской ассоциации производителей огнеупоров, в десятке лидеров – производителей огнеупоров в мире не менее пяти предприятий, дислоцированных в Китае. В 2021 г. 14 предприятий Китая имеют объем реализации более 1 млрд юаней, в том числе объем реализации трех фирм — более 50 млрд юаней (Beijing Lirr High Temperature Materials Co., Ruitai Materials Technology Co., Puyang Refractories Group Co.). Процесс укрупнения предприятий по производству огнеупорных материалов в КНР продолжается. Об этом говорит информация о планомерных шагах по укрупнению предприятий добычи магнезита и боксита. Укрупнение предприятий преследует цель концентрации средств на решении экологических проблем, на модернизацию производства, на создание и ускорение внедрения новых технологий и на организацию контроля объемов производства.

К 2025 г. в провинции Ляонин будет не более пяти горно-металлургических предприятий по добыче магнезита, объединенных в единую структуру, 51 % акций в которой уже сейчас принадлежат государству, и к 2030 г. таких фирм будет 2–3. Поэтапно подлежат укрупнению и предприятия – производители спеченного, плавленого периклаза и продукции с его использованием. В этом же направлении развиваются события и в провинциях, где осуществляются добыча бокситов, производство спеченного боксита и плавленого корунда разных сортов.

Фирма PRCO Group (далее Puyang) развивает производство в Китае, в частности введены в эксплуатацию мощности по добыче и каустизации магнезита высокого качества и по плавке периклаза (100 тыс. т) в Тибете. Компания создает новые производственные мощности на других континентах. Сообщается о создании производства оксидоуглеродистых изделий на территории США [2] с использованием собственных технологий и плавленого периклаза. В перспективе на фирме PRCO American Inc. будут четыре производственные линии, декларируется мощность первой — 22 тыс. т изделий. В США ввоз готовой огнеупорной продукции облагается значительным налогом, в то время как ввоз плавленого периклаза и графита такими налогами не облагается. В августе 2021 г. объявлено о создании предприятия на территории Сербии [3] с целью обеспечения оксидоуглеродистыми формованными и неформованными огнеупорами европейского и, возможно, российского рынка также с преимущественным использованием сырья из Китая. Начало производства во втором полугодии 2022 г. с перспективой удвоения производства оксидоуглеродистых изделий и неформованных материалов основного состава. Ввоз на территорию Белоруссии и России огнеупорной продукции, произведенной на территории Сербии, как известно, не облагается налогом. Можно ожидать и в России создание какой-нибудь из китайских фирм производства оксидоуглеродистых изделий и иных огнеупорных материалов.

Два года прошло с момента объединения крупнейших производителей огнеупоров, имеющих производственные мощности в Европе, Китае, Индии, Турции, Северной и Латинской Америке, а также несколько исследовательских структур на разных континентах с управлением из единого центра. Возникла наиболее мощная в мире на сегодня фирма RHI Magnezita. В настоящее время RHI Magnezita расширяет свои производственные и исследовательские мощности в Индии.

Фирма Tata Refractories, крупнейший производитель огнеупоров на территории Индии, вошла в состав Krosaki Harima Corporation (Япония), имеющей производственные мощности в Японии, США, Китае (четыре предприятия) и в Европе.

В Индии в 2020 г. сформировано бизнес-объединение группы компаний: Dalmia-OCL (Индия), GSP Group (Германия) и Dalmia Seven Refractories Ltd (Индия), которая была создана в 2017 г. индийской фирмой Dalmia и Seven Refractories (Словения). Новая фирма именуется Dalmia GSB Refractories GmbH Dalmia-OCL и специализируется на разработке и производстве огнеупорных материалов высокого качества как формованных, так и неформованных,

развивает свои компетенции европейского и китайского опыта в приложении к индийскому и юго-восточному рынку потребления огнеупорных материалов, включая Австралию. На территории Индии этой компанией введено (в 2020 г.) в эксплуатацию производство оксидоуглеродистых огнеупоров (первая очередь мощностью 16 тыс. т) с пошаговым увеличением объема производства до 108 тыс. т. В 2021 г. установлен новый пресс Sakmi 2000. Однако плавленый периклаз придется импортировать из Китая, и это может затруднить завоевание рынка в Индии. Компания Dalmia-OCL обсуждает создание в Индии (в 2021 г. Индия — второй в мире производитель стали (118 млн т), Россия на пятом месте (76 млн т)) совместного производства неформованных огнеупоров основного состава с немецкой фирмой Werulin GmbH.

Процесс консолидации производственных мощностей осуществляет фирма Refratechnik Holding GmbH (Германия). В 2020 г. она приобрела 100 % акций австралийской фирмы Qmag Ltd, одного из крупнейших (300 тыс. т продукции в год) производителей спеченного и плавленого периклаза высокого качества (более 97 % MgO, более 3 % CaO/SiO_2), а также каустизированного магнезита. Фирма Qmag Ltd совместно с существующими мощностями фирмы Haicheng Gnozheng (производство каустизированного магнезита и обожженного периклаза на территории КНР) укрепила сырьевой потенциал немецкой фирмы. Фирма Refratechnik также объявила о возможном возрождении производства плавленого периклаза фирмой Baymag Inc. (Канада), сырьевой базой которого является месторождение магнезитов в Канаде (> 97 % MgO на прокаленное вещество) мощностью более 50 млн т [4]. В эксплуатации в настоящее время находятся мощности по каустизации магнезита. Фирма Refratechnik совместно с немецкой фирмой Horn создала производство в Германии периклазоуглеродистых огнеупоров для футеровки сталеразливочных ковшей и ДСП с использованием рециклингуемых огнеупорных материалов [5].

Компания Imerys (Франция) подписала соглашение о приобретении 60 % акций турецких фирм Haznedar Group (производство 80 тыс. т алюмосиликатных огнеупоров в год, в первую очередь высокоглиноземистого состава) и Durer Monolitics (объем производства 50 тыс. т неформованных огнеупорных материалов в год). Haznedar Durer Refractories интегрирована в фирму Calderys, входящую, в свою очередь, в структуру компании Imerys. Imerys также стала владельцем фирмы Vardar Dolomit (Македония), производящей синтетический доломит, доломитопериклазоуглеродистые изделия и неформованные материалы, и наращивает производственные мощности в Индии. В дополнение к 16 производственным площадкам открывается новое производство неформованных огнеупоров в округе Вишакхапатнам с реализацией технологии «Индустрия 4.0», в которой будут использованы технологии, специально ориентированные на субконтинентальный климат Индии. Основной продукцией нового производства станут бетоны, получаемые с использованием продуктов собственного производства: кальцийалюминатных связующих, премиксов и т. д. В 2021 г. Imerys приобрела в Индии ведущего изготовителя силикаткальциевых теплоизоляционных плит — фирму Hysel. Несколько лет назад компания Imerys приобрела фирму Kerneos — крупного поставщика специальных огнеупорных материалов (кальцийалюминатных цементов и полуфабрикатов) и разработчика технологий в области огнеупорных неформованных материалов, производство которых расположено в Европе, а в 2021 г. — мексиканскую фирму Pyrol ltd, расширяя присутствие в Северной и Латинской Америке.

Крупнейший производитель огнеупоров в Турции фирма Kumas (собственные карьеры добычи аморфного магнезита, производство 300 тыс. т спеченного, 40 тыс. т плавленого периклаза, 100 тыс. т каустизированного магнезита, 100 тыс. т формованных изделий и 45 тыс. т неформованных огнеупоров основного состава) приобретена турецкой металлургической компанией Erdemir. Декларируемая цель — обеспечение безопасности поставок огнеупоров на турецкий рынок [6]. Эта компания теперь входит в группу горно-металлургических компаний OYAK Mining Metallurgy, которая ранее приобрела фирму Almatis (Германия) с основной производственной мощностью в Европе (600 тыс. т глиноземсодержащих продуктов, в том числе табулярного глинозема, алюмомагнезиальной шпинели и высокоглиноземистого цемента различного качества, активных и спеченных глиноземов и т. д.).

Компания Plibrico приобрела фирму Redline Industries (США), укрепляя свои позиции в производстве и поставке на рынок низкоцементных и иных бетонов и торкрет-масс различного назначения.

Компания Werulin создает фирму Weebotec — новое производство стартовых смесей для сталеразливочных ковшей в Европе.

Одновременно небольшие инжиниринговые и сервисные фирмы и фирмы, изготавливающие оригинальные огнеупорные продукты по достойной цене, успешно присутствуют на рынке и развивают свою компетенцию.

■ Развиваются новые схемы сотрудничества в огнеупорной отрасли, а также межотраслевые схемы.

Refractories (Германия), в состав которой входит группа компаний (наиболее известная

из них в России Gouda Refractories, поставляющая на Саяногорский алюминиевый комбинат и другие предприятия объединения Русал значительное количество разнообразных алюмосиликатных изделий и неформованных материалов), и Hoganas Borgestad Group (Швеция) оформили стратегическое соглашение об участии в распространении огнеупорных решений в рамках устойчивого, долгосрочного и взаимовыгодного сотрудничества в поставках продукции фирмы Hoganas. Аналогичное соглашение достигнуто фирмами Hoganas и Refratechnik.

Krosaki Harima подписала договор с польским заводом ArcelorMittal Group (Краков) о партнерстве, цель которого — оптимизация объемов производства, расширение продуктовой линейки, продвижение сервиса для покупателей с интересом во всей Европе.

Оптимизация производственной деятельности компаний – изготовителей огнеупорных материалов организуется через вовлечение компаний, специализирующихся на совершенствовании производственных и иных процессов. Например, в 2020 г. RHI Magnesita два своих европейских актива по производству периклаза высокого качества из солей, извлекаемых из морской воды, Premier Periclase Ltd в Северной Ирландии (спеченный периклаз, мощность 50 тыс. т) и Norgam A.S. в Норвегии (плавленый периклаз, мощность 80–85 тыс. т) передала в управление частной инвестиционной компании Callista Private Equity GmbH & Co. KG. (Германия).

Производители огнеупоров расширяют сотрудничество с компаниями, специализирующимися в области формирования углеродной нейтральности. Это касается и экспертизы (аудита) производства (в России многие металлургические предприятия сотрудничают в вопросах аудита и консалтинга с международной сетью компании Deloitte) в вопросах организации учета углеродных единиц, оценки углеродного следа для конкретных видов продукции.

■ Сложившиеся логистические проблемы со своевременной доставкой огнеупоров заказчикам, а также стремление уменьшить выбросы CO_2 в процессе транспортировки и тем самым снизить углеродный след применяемого продукта спровоцировали стремление к созданию и расширению производственных мощностей в непосредственной близости от предприятий – потребителей. Заметно увеличение производственных мощностей разных фирм на территории Индии, на Аравийском полуострове. Актуальна быстрая реакция на запросы заказчиков с учетом их индивидуальных пожеланий и конкретных задач в регионе. Сегодня не только европейские фирмы движутся на Восток и в Америку, а японские в Индию и в Европу, но и китайские производители огнеупоров организуют производство своей продукции в Европе и США.

Осуществляется приближение исследовательских структур к потребителям: RHI Magnezita создала в последние годы исследовательские центры в Китае и Индии. В Индии создана исследовательская структура Dalmia Institute of Scientific & Industrial Research (DISIR). В планах этого центра совершенствование огнеупоров для футеровки сталеразливочных ковшей, конвертеров, чугуновозных ковшей торпедо, неформованных огнеупоров и т. д. Расширяют сотрудничество в научной сфере с производителями огнеупоров в Индии и Китае фирмы Imerys и Almatis.

■ Перспектива оптимизации производства огнеупоров в условиях жесткой конкуренции осуществляется в следующих направлениях:

– разработка и совершенствование технологии добычи огнеупорного сырья и его комплексной переработки, в том числе расширение технологии обогащения. Актуален вопрос обогащения отвалов и недопущения захоронения в них сырья пониженного качества, обогащения сырья с получением сырьевых продуктов высоких кондиций;

– разработка новых технологий и организация производства синтетических огнеупорных сырьевых материалов, включая связующие системы для формованных и неформованных огнеупорных материалов, продукции с более высокими потребительскими свойствами; оптимизируются технологии применения огнеупорных материалов и совершенствуется специализированное оборудование;

– расширяется спрос на высококачественные огнеупоры, в том числе с высокой добавленной стоимостью, как следствие перехода к производству стали заданного качества, интенсификации и модернизации производственных процессов на металлургических предприятиях с вовлечением новых технических, технологических и конструкторских решений, что требует использования разнообразных оригинальных огнеупорных материалов в футеровке соответствующих агрегатов;

– вовлечение в производство огнеупорных материалов и технологий с использованием наряду с первородным сырьем рециклингуемых огнеупорных материалов и материалов техногенного происхождения;

– изменяется структура используемых сырьевых материалов в производстве стали и, соответственно, подход к использованию качественной огнеупорной футеровки с сохранением стойкости изделий в более жестких условиях эксплуатации. Целесообразен поиск эффективных технологий применения изделий и масс в совершенствуемых агрегатах. Например, все шире используется металлизованное сырье: горячебрикетированное железо (HBI-Hot Briqueted Iron), железо прямого восстановления (DRI-Direct Reduced Iron) и другие металлизованные продукты, производство

которых расширяется [7]. В ближайшие 3–4 года будет введен в эксплуатацию комплекс бездоменной металлургии ООО «Эколант» в Нижегородской области мощностью 1,8 млн т стальной продукции [8], новый завод по производству HBI мощностью 2,08 млн т в Белгородской области фирмой «Металлоинвест» [9]. Новое производство мощностью 2,5 млн т создается в Нидерландах. Есть информация о стремлении и иных предприятий, в том числе в России, расширить производство и применение металлизованного сырья. В процессе использования этих продуктов в плавильных агрегатах формируются агрессивные шлаковые системы, что требует конкретных технических решений для поддержания стойкости футеровки [10, 11]. Усиливается внимание к применению технологий, позволяющих снизить потери тепла в производственном цикле, что связано и с экономией в условиях растущих цен на энергоносители, и с целью снизить углеродный след для производимого продукта. Обеспечение гарантий безопасности металлургических агрегатов в эксплуатации, экологической безопасности и охрана окружающей среды, в том числе снижение производства и применения хромсодержащих огнеупоров с минимизацией контакта людей с шестивалентным хромом (Cr^{6+}) и продуктами, его содержащими, остается актуальной задачей. Для России можно ожидать отказа от применения асбестсодержащих материалов в качестве теплоизоляции, эффективной замены органическим связкам, применение которых сопровождается выделением фенола, формальдегида, алифатических углеводородов и т. д.

РАСШИРЕНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ НЕФОРМОВАННЫХ ОГНЕУПОРОВ В КАЧЕСТВЕ ФУТЕРОВКИ ТЕПЛОВЫХ, В ТОМ ЧИСЛЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ, АГРЕГАТОВ

О развитии тенденции к расширению применения монолитной футеровки разных металлургических агрегатов сказано достаточно много [1, 12, 13]. Экономическая и экологическая эффективность их применения подтверждается и зарубежной, и отечественной практикой. Фактически реализована возможность 100 %-ной замены штучных изделий в футеровке металлургических агрегатов доменного производства [1, 12, 14] с применением более стойких неформованных материалов как при выполнении новой футеровки, так и в процессе ремонтов.

Бетоны широко используются в футеровке дна и стен сталеразливочных ковшей, в том числе на предприятиях НЛМК, НЛМК-Калуга, Северсталь, ТагМет, на Надеждинском и Северском трубном металлургических заводах, на металлургическом заводе «Электросталь Тюмени», а также на металлургических заводах Белоруссии и Узбекистана, на АО «КМК-Темпо». Начато освоение этой технологии на предприятиях ММК, НЛМК-Урал и на ВТЗ. Переход к использованию бетона в рабочей футеровке сталеразливочных ковшей сопровождается снижением удельных расходов огнеупорных материалов и удельных затрат на футеровку, снижаются трудозатраты. Использование бетонов способствует снижению выбросов органических соединений в процессе разогрева и эксплуатации футеровки и теплопотерь через футеровку. Углеродный след для конечной продукции при использовании монолита более низкий, отсутствует науглероживание стали. Расширяется применение монолитного высокоглиноземистого бетона (на основе спеченного боксита, андалузита, синтетических материалов системы Al_2O_3–SiO_2) в контрольной футеровке сталеразливочных ковшей со снижением удельного расхода огнеупоров. Бетон обеспечивает большую безопасность в случае проникновения металла через рабочую футеровку, чем при использовании штучных огнеупоров, и т. д. Неформованные материалы используются и в качестве ремонтных на разных участках футеровки сталеразливочных ковшей.

Технология находится в постоянном развитии как с точки зрения применяемых материалов, так и с точки зрения технологии использования бетонов, торкрет(шоткрет)-масс с задачей повысить стойкость и снизить удельные затраты.

Компания Imerys [15] предлагает новую технологию применения бетона в футеровке сталеразливочных ковшей. За счет правильно подобранного ремонтного материала можно добиться его надежного приваривания к слою бетона футеровки, пропитанному шлаком. Таким образом, по мнению авторов, нет необходимости убирать этот слой бетона перед ремонтом, что существенно снизит расход бетона и, соответственно, затраты на него. Частичное преобразование оксидов огнеупорной футеровки в герцинит ($FeO{\cdot}Al_2O_3$) способствует надежному привариванию новой порции бетона к ошлакованной поверхности. Насколько эффективна предлагаемая технология, покажет опыт ее практического применения.

К настоящему времени на всех металлургических предприятиях, за редким исключением, в промежуточных ковшах МНЛЗ в качестве контрольного и рабочего слоев футеровки используются бетоны высокоглиноземистого состава и торкрет-массы основного состава соответственно. Пока не нашли достойное применение в России сухие массы в рабочей футеровке промежуточных ковшей МНЛЗ [16], несмотря на очевидные преимущества этой технологии.

В ПАО «Северсталь» успешно эксплуатируются чугунозаливочные ковши с использованием огнеупорного бетона в футеровке дна, что

позволило увеличить стойкость футеровки и снизить удельный расход огнеупоров. В горловине футеровки чугуновозного ковша торпедо используют огнеупорный бетон, а для ухода за футеровкой в приемной ванне этого агрегата — саморастекающуюся массу, что давно является нормой. Появилась публикация об успешной апробации огнеупорного бетона в футеровке цилиндров 330-т чугуновозных ковшей торпедо [17].

Использование торкретирования и шоткретирования с целью увеличения стойкости сталеразливочных ковшей (стен, в том числе в шлаковой и подшлаковой зоне, а иногда и дна) [18, 19], для горячего ремонта футеровки конвертеров, ДСП, патрубков вакууматоров [20–22] эффективно во многих случаях. Горячий локальный ремонт футеровки конвертеров осуществляется и с использованием саморастекающихся масс основного состава на основе алюмосодержащих материалов, а также подварки. Применение современных масс в футеровке и для горячего ремонта как подины, так и откосов ДСП позволяет достигать высокой стойкости с минимальными затратами огнеупорных материалов и рабочего времени для выполнения соответствующих операций [1, 23, 24].

В то же время следует правильно оценивать затраты, потери производства и преимущества от реализации тех или иных мероприятий по уходу за рабочей футеровкой металлургических агрегатов, включая затраты на исходную футеровку [1].

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ, СНИЖАЮЩИХ АГРЕССИВНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ РАСПЛАВОВ МЕТАЛЛА И ШЛАКА НА ФУТЕРОВКУ

Существенную роль при решении задачи повышения стойкости футеровки сталеплавильных агрегатов, вакууматоров и сталеразливочных ковшей играет шлаковый режим. Нанесение шлакового гарнисажа на рабочую футеровку конвертера методом раздува шлака азотом высокого давления — общепринятая технология.

Рис. 3. Патрубки-моноблоки RH-вакууматоров

Для формирования качественного гарнисажа перед раздувом шлак обогащают высокомагнезиальными флюсами, доломитом или доломитизированной известью. Стандартный прием снижения агрессивности шлака в агрегате основан на затруднении перехода MgO из огнеупора футеровки в шлак. Это достигается за счет изменения условий массопереноса MgO, что приближает его концентрацию в шлаке к пределу растворимости MgO из футеровки основного состава в соответствующем шлаке [25]. Прием эффективен для повышения стойкости футеровки конвертеров, ДСП и сталеразливочных ковшей [2, 26–28].

Флюсующие добавки системы $CaO–Al_2O_3–MgO–SiO_2$ используются на многих предприятиях с целью сформировать в ковше рафинировочный шлак надлежащего качества и одновременно снизить агрессивное воздействие шлака на футеровку. Задача решается при минимизации использования, вплоть до полного исключения из состава шлака, флюорита (CaF_2). Выбор флюса для корректировки состава шлака ориентируется на конкретные условия применения [29, 30].

Актуальной является технология вспенивания шлака в сталеплавильных агрегатах для экранирования воздействия теплового излучения на огнеупорный материал футеровки [31].

Радикальным техническим решением повышения стойкости агрегата или его части является перенос выполнения футеровочных работ в зону квалифицированной ответственности изготовителя огнеупоров (рис. 3). Патрубки вакууматоров в России традиционно собираются в ковшовом отделении (участке) металлургического производства. Сегодня в мировой практике (в России на НЛМК) используют патрубки RH-вакууматоров, собранные на заводе – изготовителе огнеупоров. У заказчика патрубок-моноблок приваривается к нижней части камеры вакууматора.

Сборка на огнеупорном предприятии [32] осуществляется с соблюдением технологии и контроля за выполнением внутренней футеровки патрубка: установка заранее стендированных изделий, формирующих канал патрубка, заполнение зазора огнеупорные изделия – металлическая обечайка, выполнение наружной части патрубка из огнеупорного бетона с последующей сушкой всей сборки по режиму. Важную роль играют качество металла обечайки, приваривание трубок аргонопроводов во всасывающих патрубках и система анкеров, используемых в сборке [2, 25].

ЧИСТАЯ СТАЛЬ

Термин чистая сталь объединяет множество концепций, актуальных для каждого конкрет-

ного случая производства металла с заданными характеристиками. Процессы получения чистой стали изучены достаточно подробно, вопрос в их адекватной реализации.

Одной из задач производства стали с заданными свойствами является контроль за содержанием и качеством неметаллических включений (эндогенных, экзогенных и смешанных) на всех этапах производственного процесса. В первую очередь во время внепечной обработки стали в сталеразливочном ковше, в период длительного контакта металла с его огнеупорной футеровкой и затем в процессе разливки металла на МНЛЗ. Необходимо предотвратить попадание неметаллических включений (НВ) в непрерывно-литую заготовку на участке промежуточный ковш МНЛЗ – кристаллизатор.

Источником экзогенных НВ могут быть используемые огнеупорные футеровка и изделия, шлак. Источником эндогенных НВ могут быть в том числе огнеупорные оксиды футеровки сталеразливочного ковша [1, 33], а также шлак [34]. Реокисление стали имеет место как результат недостаточной термодинамической стабильности оксидов футеровки, что способствует повторному окислению компонентов стали в процессе ее контакта с футеровкой. Во избежание попадания кислорода в сталь из огнеупорной футеровки необходимо, чтобы парциальное давление кислорода огнеупорных оксидов — компонентов футеровки — было ниже, чем парциальное давление кислорода в стали. Известно, что Al_2O_3, MgO и CaO — это оксиды, которые стабильны (диаграмма Richardson-Jeffes, рис. 4) при условиях обработки металла (1600 °С) в сталеразливочном ковше, где парциальное давление кислорода $P_{O_2} < 0{,}15$ бар.

Основные материалы рабочей футеровки агрегатов в сталеплавильном производстве, такие как периклазоуглеродистые, алюмопериклазоуглеродистые, алюмошпинельные, доломитовые и периклазодоломитоуглеродистые не склонны к диссоциации оксидов с выделением кислорода, который в дальнейшем взаимодействует с алюминием, растворенным в стали, с образованием соответствующих НВ. Но для MgO вероятность процесса больше, чем для доломитсодержащих и изготовленных на основе глинозема [33, 35]. Более высокая температура и тем более наличие вакуума (низкое парциальное давление кислорода) при высокой температуре интенсифицирует диссоциацию MgO футеровки с появлением Mg в атомарном состоянии. Известно также, что MgO восстанавливается углеродом футеровки по реакции $MgO_{огн} + C_{огн} \rightarrow \{Mg_г\} + \{CO_г\}$ (рис. 5). При определенных условиях эти процессы конкурируют. Появление Mg в атомарном состоянии по любому из вариантов ведет

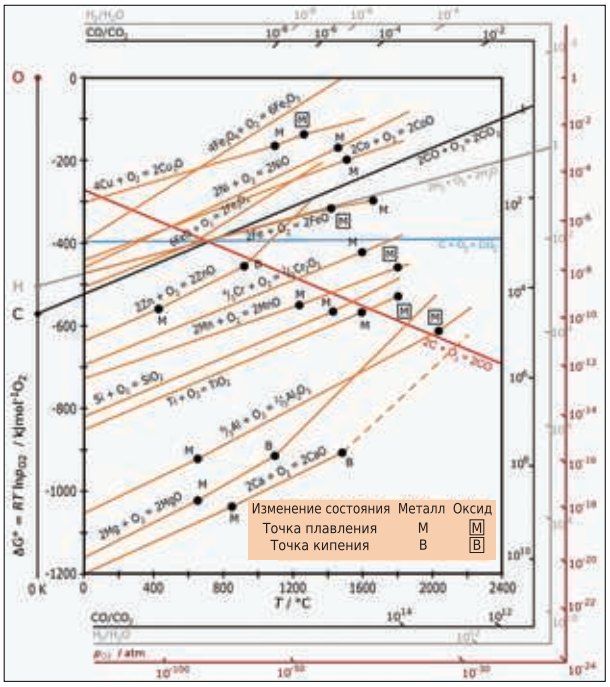

Рис. 4. Диаграмма Richardson – Jeffes

к взаимодействию с оксидом алюминия, присутствующим в стали, с образованием алюмомагнезиальной шпинели.

Известно, что использование доломитсодержащей футеровки сталеразливочных ковшей позволяет получить более предпочтительные НВ (жидкие алюминатные) по сравнению с преобладающими шпинельсодержащими включениями при магнезиальной (периклазосодержащей) футеровке. Применение обожженных огнеупоров системы CaO–MgO и чаще безобжиговых системы CaO–MgO–C с разным соотношением оксидов и с содержанием углерода в последних до 15 % широко используется в футеровке сталеразливочных ковшей [12] и в футеровке агрегатов VOD, в производстве легированных и нержавеющих марок стали. Эти огнеупоры обладают

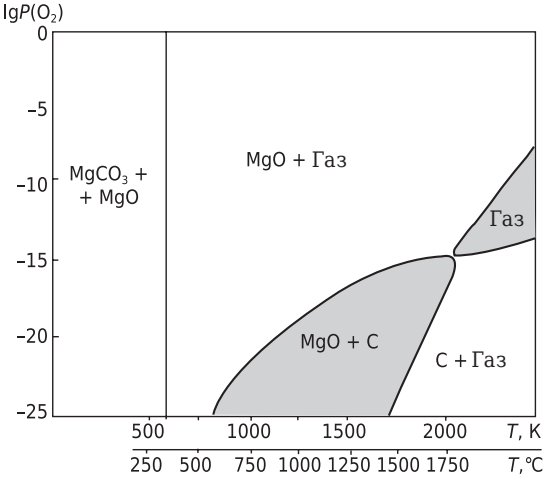

Рис. 5. Диаграмма состояния в системе MgO–C

низким окислительным потенциалом наряду с достаточной устойчивостью к основным шлакам, в то же время привлекает сравнительно доступная цена и доступность в плане поставок, а также отработанная технология предотвращения гидратации при транспортировке, хранении и эксплуатации доломитсодержащей футеровки.

Одновременно огнеупорный материал участвует в создании условий для удаления включений из металла. Отсечка шлака при сливе металла из сталеплавильного агрегата, продувка аргоном через дно сталеразливочного ковша [36], организация потоков металла в промежуточном ковше МНЛЗ с всплытием НВ к ассимилирующему покровному шлаку с использованием металлоприемников (турбостопов), порогов и перегородок различной конфигурации, в том числе перфорированных и с организацией перемещения потока металла к покровному шлаку — продувкой металла аргоном. Предотвращение подсоса воздуха в стык огнеупоров на всех участках тракта сталеразливочный ковш – кристаллизатор [37, 38] способствует решению задачи.

Удаление углерода из металла производится во время кислородного дутья в ДСП и кислородном конвертере. В процессе вакуумной обработки металла в сталеразливочном ковше производится дальнейшее снижение содержания углерода до заданного.

Одним из актуальных вопросов внепечной обработки стали при производстве низкоуглеродистых и сверхнизкоуглеродистых марок стали, используемых в автомобилестроении, электротехнических марок стали, является предотвращение ее науглероживания в процессе и после вакуумной обработки металла в ковше. Возможным источником науглероживания металла также является углерод из углеродсодержащей футеровки сталеразливочного ковша [39]. На рис. 6 показаны результаты исследований в производственных условиях распределения плавок в период кампании 120-т сталеразливочного ковша в конвертерном производстве.

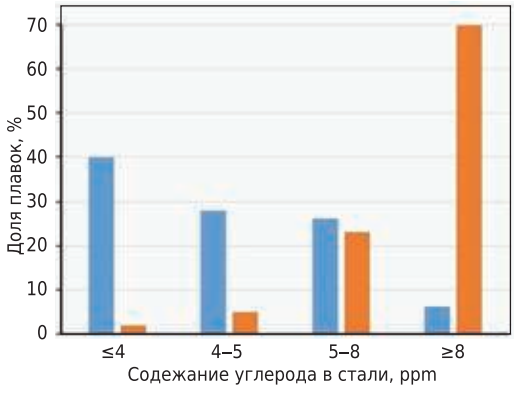

Рис. 6. Степень науглероживания стали в зависимости от качества изделий в рабочей футеровке сталеразливочного ковша: ■ — безуглеродистая футеровка дна и стен; ■ — углеродсодержащая футеровка

Фиксировали содержание углерода на каждой плавке кампании ковшей для оксидоуглеродистой футеровки и для варианта безуглеродистой футеровки дна и стен; шлаковый пояс в обоих случаях выполнен периклазоуглеродистыми изделиями с содержанием углерода (графит и коксовый остаток от углеродистого связующего) 13,5 %. Для углеродсодержащей футеровки на протяжении всей кампании ковша среднее содержание углерода в металле составляло 19 ppm, для безуглеродистой футеровки 4,3 ppm.

Проблема с устранением науглероживания решается использованием в футеровке сталеразливочного ковша огнеупорных материалов соответствующего качества (рис. 7): футеровку дна и стен сталеразливочного ковша выполняют с использованием безуглеродистых огнеупоров — бетонов и «pre-cast» изделий системы Al_2O_3–MgO, обожженных изделий системы MgO–CaO [12, 40]. Стойкость предлагаемых безуглеродистых огнеупоров в рабочей футеровке стен ковшей фактически соответствует стойкости оксидоуглеродистых огнеупоров и даже превосходит ее.

Для получения высокой стойкости футеровки в шлаковом поясе необходимо использовать периклазоуглеродистые изделия, но они остаются источником углерода при науглероживании стали. Наряду со стандартными периклазоуглеродистыми изделиями (11–14 % С) можно использовать изделия с пониженным содержанием углерода (5–6 %) в шлаковом поясе с сохранением эрозионной и термомеханической устойчивости.

Индийские коллеги провели испытания периклазоуглеродистых изделий, в составе которых присутствуют многостенные углеродистые трубки (наноматериал), в шлаковом поясе 300-т сталеразливочных ковшей. После 55 плавок износ участков с использованием опытных огнеупоров оказался на 28 % меньше, чем при использовании изделий со стандартно высоким содержанием углерода.

С 90-х годов прошлого века ведутся работы по созданию огнеупора для шлакового пояса без углерода с сохранением соответствующей стойкости футеровки. Решение пока не найдено. В настоящее время можно использовать в шлаковом поясе безуглеродистые торкретмассы в сочетании с безуглеродистым бетоном и изделиями.

Технология увеличения стойкости футеровки сталеразливочного ковша за счет формирования гарнисажа на рабочей поверхности футеровки одновременно является источником НВ [41, 42]. Целесообразно учитывать и этот момент.

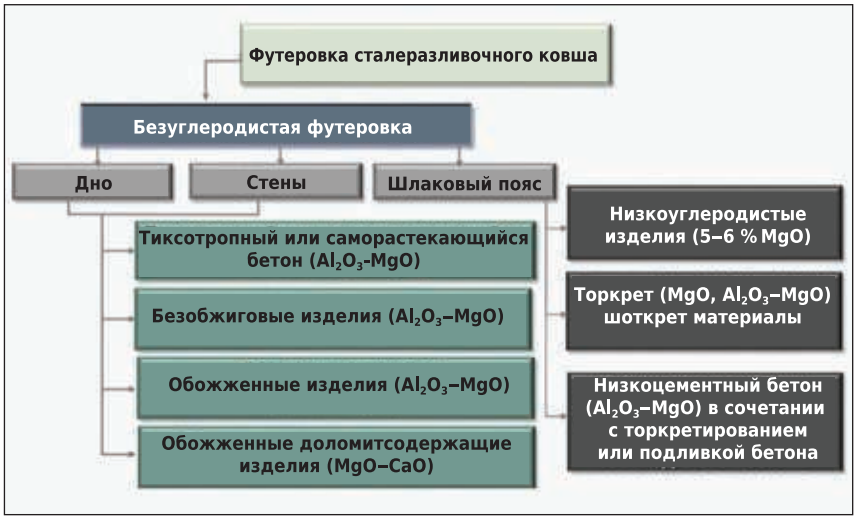

Рис. 7. Варианты футеровки рабочего слоя сталеразливочного ковша при необходимости производства низко(ультранизко)углеродистого сортамента металла

Задача производства стали заданного качества требует совместной работы поставщика огнеупоров и инженерных служб металлургического предприятия.

ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ И СНИЖЕНИЕ ЭМИССИИ CO_2

Задача энергосбережения все более актуальна в металлургии, и не только [43, 44]. Если изначально речь шла о снижении расхода энергии на единицу продукции, то последние пять-десять лет все более активно обсуждается вопрос снижения углеродного следа, снижения эмиссии CO_2 [45] во всей производственной цепочке во всех отраслях.

Многообразны технологии использования в металлургических агрегатах футеровки с более низкой теплопроводностью, например применение алюмошпинельной футеровки сталеразливочных ковшей взамен периклазоуглеродистой [12, 13]. Контроль за теплопотерями при использовании бетонной футеровки сталеразливочного ковша (дно и стены) в сравнении с периклазоуглеродистой футеровкой на металлургическом заводе Voest Alpine (Австрия) выявил на 15 °С более низкую температуру на корпусе сталеразливочного ковша для бетонной футеровки стен системы MgO–Al_2O_3, несмотря на наличие дополнительной теплоизоляции при использовании периклазоуглеродистой футеровки. Из опыта европейских металлургов известно, что сокращение потери тепла, эквивалентное 10 °С, через футеровку сталеразливочного ковша позволяет экономить 0,03–0,05 евро/т стали.

Ту же цель преследует и использование крышек на сталеразливочных ковшах, футерованных теплоизоляционными материалами; укрытий желобов и теплоизоляции главных желобов на литейном дворе; теплоизоляционных материалов в футеровке печных агрегатов разного назначения, теплоизоляционных материалов (ТИС) на мениске металла в чугуновозных ковшах, в промежуточных ковшах МНЛЗ и сталеразливочных ковшах и т. д.

Для решения задач энергосбережения существуют разнообразные материалы: бетоны и торкрет-массы с пониженной теплопроводностью; материалы на основе керамического волокна, работоспособные в широком диапазоне температур; изделия разной плотности и теплопроводности на основе технологий с использованием выгорающих добавок, пустотелых керамических гранул и т. д. Применение теплоизоляции создает условия для снижения количества сжигаемого топлива, снижения производственных затрат через минимизацию расхода энергии в период эксплуатации металлургического агрегата, для сокращения эмиссии CO_2 в атмосферу.

Перегрев чугуна перед выпуском из домны, стали из сталеплавильного агрегата можно регулировать, используя эффективную теплоизоляцию передающих и транспортирующих устройств и агрегатов, обеспечивая более низкое падение температуры и, соответственно, снижение затрат. Используя качественную теплоизоляцию чугуновозных ковшей торпедо со снижением температуры чугуна на выпуске на 20–25 °С, можно снизить расход кокса на 5 кг/т чугуна, выплавляемого в домне; соответственно, снижаются и выбросы CO_2 в атмосферу. Сохранение температуры чугуна в чугуновозном ковше и, соответственно, чугуна, подаваемого в конвертер, позволяет снизить расход природного газа, сжигаемого в конвертере.

Применение современных бикерамических периклазошпинелидных огнеупоров или двухслойной футеровки вращающихся печей обжига цемента, извести и доломита позволяет снизить

потери тепла через корпус печи на 30 %, что также способствует снижению затрат и снижению эмиссии CO_2.

На протяжении многих лет в Китае и Европе (рис. 8) интенсивно используется сухая (воду в эту массу при применении не добавляют) рабочая футеровка промежуточных ковшей МНЛЗ [16].

Одним из преимуществ этой технологии является ускоренная сушка рабочей футеровки с минимальным расходом энергии (газа) в сравнении с применяемой и в России болотной торкрет-массой, в которую при выполнении футеровки вводится до 25 % воды. Следует заметить, что на Ижевском металлургическом заводе сухая футеровка промежуточных ковшей используется много лет.

От обсуждения вопросов снижения эмиссии CO_2, углеродного следа в производственно-сбытовой цепочке при изготовлении огнеупорных изделий и неформованных материалов на ведущих предприятиях переходят к реализации технических мер. Для предприятий, производящих огнеупоры на основе периклаза и обожженного доломита с использованием в качестве сырья карбонатных пород, вопрос эмиссии CO_2 особенно осложнен. RHI Magnezita инвестирует 50 млн евро в ближайшие четыре года в технологии снижения выбросов CO_2, в том числе в технологии его улавливания. Потребителю будут предложены огнеупорные материалы, использование которых позволит снизить углеродный след конечной продукции (металла, цемента и т. д.) [46]. В ноябре 2021 г. четыре завода фирмы RHI Magnezita получили сертификат ISO 50001, который предоставляется организациям с системами и процессами, необходимыми для повышения энергоэффективности. Энергоэффективность является одним из ключевых корпоративных проектов компаний по снижению выбросов CO_2. Согласно плану фирмы RHI Magnezita, энергоэффективность будет увеличиваться на 1 % ежегодно. Вопрос снижения углеродного следа касается и огнеупорных бетонов [47].

Шведская фирма Calderis Nordic AB-Hoganas, дочерняя структура фирмы Imerys, осуществляющая производство неформованных огнеупорных материалов, будет работать за счет возобновляемых источников энергии в производстве продукции в рамках программы по сокращению выбросов CO_2. Электроэнергию на предприятии получат за счет энергии ветра и солнца. Газ будет получен из биогаза, как продукта переработки отходов производства сельхозпродуктов и пищевых отходов [48].

Австралийская фирма QMAG, один из лидеров в производстве периклаза высокого качества, собирается достичь углеродной нейтральности к 2050 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Развитие огнеупорной промышленности опирается на укрупнение компаний – производителей продукции с целью концентрации средств на разработку новых конкурентоспособных технологий, модернизацию производства, расширение контактов изготовителей (поставщиков) огнеупорных материалов с предприятиями – потребителями огнеупоров и соответствующих услуг.

2. Обновляются технологии в производстве металла. Постоянно требуются решения, гарантирующие повышение качества производимой продукции, решение задачи производства металла с заданными свойствами — чистая сталь, это требует создания и внедрения новых инженерных решений, новых огнеупорных материалов, технологии их изготовления и применения.

Рис. 8. Футеровка промежуточного ковша МНЛЗ сухой массой (слева — футеровка дна; справа —стены)

3. Огнеупорные материалы участвуют в решении высокотехнологичных задач энерго- и ресурсосбережения, в снижении эмиссии CO_2, в вовлечении в производство рециклингуемых материалов и материалов техногенного происхождения. Повышение энергоэффективности (снижение затрат) с использованием соответствующих огнеупорных материалов — это одновременно самый доступный путь для учета декарбонизации в настоящее время.

4. Продолжаются изменения в структуре применения огнеупорных материалов с опережающим развитием использования неформованных материалов, а также применение материалов высокого качества с более высокой стоимостью.

Библиографический список

1. ***Аксельрод, Л. М.*** Огнеупорная отрасль в 2020 г. Тенденции ее развития. Часть 1 / *Л. М. Аксельрод, В. Гартен* // Новые огнеупоры. — 2021. — № 12. — С. 61–69.

2. http://imformed.com/magnesia-from-the-roof-of-the-world-to-kentucky/(дата обращения -20.01.2022)

3. http://www.refwin.com/news/NewsDetail/14238/1/ Puyang Refractories plans to acquire Serbia MALBEX ONE (дата обращения 10.09.2021)

4. (www.refra.com/en/Baymag/) (дата обращения 19.07.2021)

5. http://imformed.com/refractory-mineral-maelstrom-the-heat-is-on-seen-heard-at-icr-aachen/ (дата обращения -21.10.2021

6. http://imformed.com/magnesia-refractories-major-kumas-acquired-by-turkish-steel-leader-erdemir/ (дата обращения 15.09.2021)

7. http://ow.Ly/5xck 50GvVRI

8. http:// government-nnov.ru/?id=279207 (дата обращения 25.04.2021)

9. https://www.metalloinvest.com/media/press-releases/599417/ (дата обращения 25.07.2021)

10. ***Торохов, Г. В.*** Современное состояние и перспективы металлургии железа / *Г. В. Торохов, А. Я. Травянов, О. В. Голубев, П. И. Черноусов* // Сб. трудов, XVI Международный конгресс металлургов и производителей металла, Екатеринбург. — 2021. — С. 26–37.

11. ***Коростелев, А. А.*** Повышение стойкости футеровки ДСП при использовании ГБЖ в завалке / *А. А. Коростелев, Н. С. Съемщиков, А. Е. Семин* [и др.] // Новые огнеупоры. — 2018. — № 3. — С. 3–10.

12. ***Аксельрод, Л. М.*** Альтернативная футеровка сталеразливочных ковшей: технический и экономический аспекты / *Л. М. Аксельрод, В. Гартен* // Бюл. Черная металлургия. — 2018. — № 12. — С. 72–80.

13. ***Buhr, A.*** Value enhancement through engeneered alumina products for monolithic and brick applications / *A. Buhr* //11-th INDIA international refractories congress. INTERCOM 16. 20-22 JANUARY 2016, Hyderabad, India. — P. 77–81.

14. ***Джермейко, А. Д.*** Закат эры рабочей углеродистой футеровки металлоприемника доменной печи / *А. Д. Джермейко* // Новые огнеупоры. — 2021. — № 5. — С. 73–87.

15. ***Wohrmeyer, C.*** How to improve the between used steel ladle castable substrat and dry gunning repair mix / *C. Wohrmeyer, M. Szepizdun, P. M. Mineau, J. Gao* // 62rd International colloquium on Refractories 2019, Aachen. — 2019. — P. 58–63.

16. ***Аксельрод, Л. М.*** Внедрение технологии изготовления рабочей футеровки промежуточных ковшей «сухими» магнезиальными массами / *Л. М. Аксельрод, Н. В. Горелов, Е. М. Сладков* [и др.] // Металл и литье Украины. — 2010. — № 9/10. — С. 11–15.

17. ***Macros, C.*** Torpedo ladle: monolithic lining improvements / *C. Macros, P. Dias, D. Garcia, J. Martinez* // European steel technology and application days 2017-ESTAD 2017. — P. 321–326.

18. ***Кочергина, Л. Р.*** Применение метода шоткретирования для восстановления рабочего слоя футеровки сталеразливочных ковшей кислородно-конверторного цеха ПАО ММК / *Л. Р. Кочергина, С. В. Шевченко, Б. А. Сарычев* // Новые огнеупоры. — 2020. — № 10. — С. 3–5.

19. ***Capelty, G.*** Steel ladle manadgement % an integrated view of the challenges in resistance, environmental impact, and economic issues / *G. Capelty, L. Folco* // 63rd International colloquium on Refractories 2020, Aachen. — 2020. — P. 161–166.

20. ***Pudack, A.*** CONREP and CONSCAN: an innovative basic oxigen furnace high speed gunning system / *A. Pudack, R. Pungersek, R. Lanzenberger, V. Wummer* // RHI Bulletin. — 2007. — № 1. — P. 14–19.

21. ***Firsbach, F.*** Dolomit based EAF hot repair material an alternative to magnesia based materials / *F. Firsbach, M. Nispel, G. Bruel* [et al.] // 63th International Colloquium on Refractories 2020, 16–17.09, Aachen, Germany. — P. 150–160.

22. RH Gunning Manipulator SGFS // Refractories WORLDFORUM. — 2020. — № 1. — P. 16.

23. ***Eckstein, W.*** ANKERHART mixes for the electric Arc Furnace — designed for the future / *W. Eckstein, A. Kronthaler, M. Silbernagl* // RHI Bulletin. — 2004. — № 1. — P. 24.

24. ***Зуев, М. В.*** Результаты эксплуатации ДСП-135 на АО СТЗ в период 2008–2021 гг. / *М. В. Зуев, А. В. Мурзин, Л. В. Зубаков* [и др.] // Сборник трудов XVI Международного конгресса сталеплавильщиков и производителей металла, 2021, Екатеринбург. — С. 198–200.

25. ***Демидов, К. Н.*** Высокомагнезиальные флюсы для сталеплавильного производства / *К. Н. Демидов, Т. В. Борисова, А. П. Возчиков* [и др.]. — Екатеринбург : Уральский рабочий, 2013. — 280 с.

26. ***Бондаренко, И. А.*** Тенденции по увеличению стойкости периклазоуглеродистых изделий в рабочей футеровке сталеразливочных ковшей в условиях ОАО «БМЗ» — Управляющая компания холдинга БМК» / *И. А. Бондаренко, А. К. Турыгин, А. Л. Артамошин* [и др.] // Литье и металлургия. — 2016. — № 1. — С. 82–84.

27. ***Оржех, М. Б.*** Практика применения магнезиальных модификаторов шлака в электросталеплавильных печах и сталеразливочных ковшах / *М. Б. Оржех, Л. М. Аксельрод, М. Ю. Турчин* [и др.] // Новые огнеупоры. — 2011. — № 6. — С. 56–58.

28. ***Михеенков, М. А.*** Изучение влияния фазового состава рафинировочного шлака на стойкость футеровки агрегата «ковш-печь» / *М. А. Михеенков, О. Ю. Шешуков, И. В. Некрасов* [и др.] // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. — 2015. — Т. 1, № 1. — С. 168–170.

29. ***Шешуков, О. Ю.*** Анализ влияния глиноземсодержащих добавок на шлакообразование при внепечной обработке стали / *О. Ю. Шешуков, М. А. Михеенков, И. В. Некрасов* [и др.] // Бюл. Черная металлургия. — 2018. — № 7. — С. 56–63.

30. ***Богун, Ф. П.*** Совершенствование шлакового режима при внепечной доводке стали как инструмент повышения качества металлопродукции / *Ф. П. Богун, В. В. Чурилов* // Сб. трудов XVI Международного конгресса сталеплавильщиков и производителей металла, 2021, Екатеринбург. — С. 141–145.

31. ***Luz, A. P.*** Slag foaming: fundamental evaluation and application in the steelmaking industry / *A. P. Luz, T. A. Avila, P. Bonadia* [et al.] // Refractories Worldforum. — 2011. — Vol. 3, № 2. — P. 91–98.

32. ***Kumar, S.*** Latest developments in RI-degasser snorkels / *S. Kumar, A. Kremer* // UNITECR 2017, Kioto, Gapanis, 2017, Proceeding 63.

33. ***Аксельрод, Л. М.*** Роль огнеупоров в производстве «чистой стали» / *Л. М. Аксельрод, И. В. Кушнерев* // XIV Международный конгресс сталеплавильщиков, 2017, Электросталь. — С. 36–47.

34. ***Казаков, А. А.*** Интерпретация природы неметаллических включений при оценке качества металлопродукции в условиях заводской практики / *А. А. Казаков, В. А. Мурысев, Д. В. Киселев* // Черные металлы. — 2021. — № 10. — С. 47–54.

35. ***Ботников, С. А.*** Технологические аспекты производства чистой стали в сталеразливочном ковше для трубного сортамента / *С. А. Ботников* // Тяжелое машиностроение. — 2018. — № 11/12. — С. 2–7.

36. ***Дюдкин, Д. А.*** Производство стали на агрегате ковш-печь / *Д. А. Дюдкин, С. Ю. Бать, С. Е. Гринберг, С. Н. Маринцев* ; под науч. ред. докт. техн. наук, проф. Д. А. Дюдкина. — Донецк : ОАО «Юго-Восток, Лтд», 2003. — 300 с.

37. ***Смирнов, А. Н.*** Непрерывная разливка стали / *А. Н. Смирнов, С. В. Куберский, Е. В. Штепан*. — Донецк : ДонНИТУ, 2011. — 482 с.

38. ***Гончар, Б. С.*** Анализ гидрогазодинамических факторов, обеспечивающих эффективное удаление неметаллических включений при непрерывном рафинировании жидкой стали в промежуточном ковше МНЛЗ / *Б. С. Гончар, А. В. Ноговицын, Е. Ф. Дидюк* [и др.] // Сталь. — 2012. — № 1. — С. 17–19.

39. ***Li, S.*** Comparative analysis on new type carbon free lining and traditional carbon containing lining applied on 120-ton LF–RH refining ladle / *S. Li, H. Zhang, Xuedong Li* [et al.] // China's Refractories. — 2017. — Vol. 26, № 2. — P. 35–38.

40. ***Buhr, A.*** The steel industry in Germany — trends in clean steel technology and refractory engineering / *A. Buhr, R. Bruckhausen, R. Fahndrich* // Refractories WORLDFORUM. — 2016. — № 1. — P. 57–63.

41. ***Амежнов, А. В.*** Футеровка сталеразливочного ковша как один из источников неметаллических включений в современных сталях / *А. В. Амежнов* // Новые огнеупоры. — 2019. — № 5. — С. 10, 11.

42. ***Du, Sichen.*** The effect of slag-refractory reaction on steel cleanness / *Du Sichen, Mselly Nzotta, Monho Song* // 5th International Congress on the Science and Technology of Steelmaking 2012, Dresden, Oct. 1–3.

43. ***Кузин, В. И.*** Способы повышения энергоэффективности футеровки тепловых агрегатов / *В. И. Кузин* // Новые огнеупоры. — 2014. — № 11. — С. 4–11.

44. ***Wynn, Andy.*** Insulating firebricks — maximizing energy savings in iron and steel applications through product selection / *Andy Wynn* // Refractories Manual. — 2012. — № 2. — P. 83–88.

45. ***Еланский, Д. Г.*** Безуглеродная черная металлургия -пути и их стоимость / *Д. Г. Еланский* // Труды XVI Конгресса сталеплавильщиков. — Екатеринбург. 2021. — С. 51–56.

46. ***Henry-Lanier, E.*** The optimisation of the carbon footprint of calciumaluminate cement containing castables / *E. Henry-Lanier, M. Szepizdyn, C. Parr* // Refractories Worldforum. — 2016. — № 8. — P. 81–86.

47. ***Ribeiro, T.*** Alternatives to reduce the carbon footprint in refractory raw material production processes / *T. Ribeiro, P. Bonadia, E. Gueguen, F. Maier, T. Drnek* // Bulletin RHI. — 2021. — P. 16–21.

48. https://linkd.in/dp46hAyk (обращение 25.12.2021 г.)■

Получено 08.02.22

© Л. М. Аксельрод, 2022 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ