

УДК 666.762.11+666.762.36]:[621.746.329:66.043.1(430)

ГЛОБАЛЬНЫЕ ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ГЛИНОЗЕМОШПИНЕЛЬНОЙ ФУТЕРОВКИ В СТАЛЕРАЗЛИВОЧНОМ КОВШЕ

Разработки в области производства высококачественных сталей, например для автомобильной промышленности, требуют пересмотра состава футеровки сталеразливочного ковша. Наряду со сроком службы и прямыми затратами на огнеупоры при расчете общих затрат на эксплуатацию важное значение приобрели вместимость сталеразливочного ковша, факторы, влияющие на качество стали, и оптимизация энергопотребления. В настоящей статье рассмотрены развитие концепции глиноземошпинельной футеровки сталеразливочного ковша и ее специфические преимущества.

Ключевые слова: сталеразливочный ковш, требования к футеровке, затраты на огнеупоры, вместимость сталеразливочного ковша, качество стали, экономия энергоресурсов, особонизкоуглеродистая сталь (ULC), глиноземошпинельные материалы, периклазоуглеродистые изделия.

ВВЕДЕНИЕ

Совершенствование технологии производства стали за последние 50 лет позволило значительно снизить металлоемкость и одновременно улучшить прочностные характеристики стальных изделий (рис. 1). Для автомобилестроения были разработаны особонизкоуглеродистые (ULC) и высокопрочные низколегированные (HSLA) стали, производство которых требует комплексной внепечной обработки расплава в сталеразливочном ковше [2].

Показано [2], что футеровка сталеразливочного ковша также участвует в обеспечении требуемого качества стали. При этом глиноземошпинельные материалы обладают дополнительными преимуществами при производстве высококачественной стали. В настоящей статье представлены ключевые аспекты развития такой футеровки сталеразливочного ковша.



Рис. 1. Изменение качества стали для производства упаковки и автомобилестроения [1]: ■ — рядовая низкоуглеродистая сталь; ■ — усовершенствованная сталь повышенной прочности

ТРЕБОВАНИЯ К ФУТЕРОВКЕ СТАЛЕРАЗЛИВОЧНЫХ КОВШЕЙ

Футеровка сталеразливочного ковша должна удовлетворять целому ряду критериев. На рис. 2 показано, как изменилось относительное значение каждого критерия с 1990 по 2010 г. Следует отметить, что безопасность всегда имела первостепенное значение и поэтому здесь не рассматривается.



С. Клаус

E-mail: Sebastian.Klaus@almatis.com

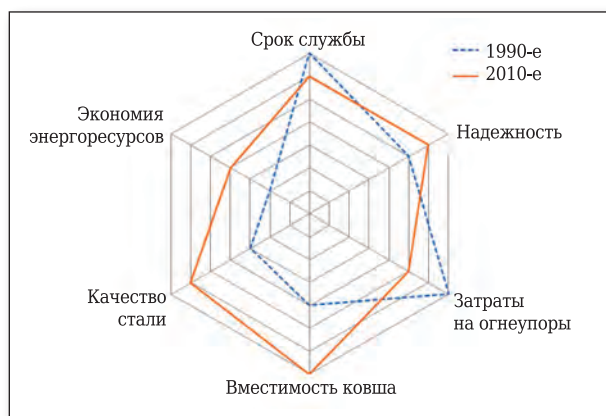


Рис. 2. Критерии оценки качества футеровки сталеразливочного ковша в 1990-е и 2010-е годы (безопасность всегда имела первостепенное значение)

За последние 25 лет серьезно возросло значение таких критериев, как вместимость ковша и качество стали. Вместе с тем больше внимания стало уделяться энергопотреблению. Затраты на огнеупорные материалы и срок их службы более не являются единственными определяющими критериями. Современный подход предполагает оценку дополнительных факторов, что усложняет задачу.

ГЛИНОЗЕМОШПИНЕЛЬНАЯ ФУТЕРОВКА СТАЛЕРАЗЛИВОЧНОГО КОВША

Использование шпинели ($MgAl_2O_4$) в производстве бетонных изделий, таких как продувочные пробки, гнездовые блоки и «бойные» плиты, началось в 1990-е годы и стало неофициальным отраслевым стандартом. Появление шпинелей AR 78 и AR 90 [3], обогащенных глиноземом, способствовало росту эксплуатационных показателей глиноземистых бетонов, в частности прочности при высоких температурах, стойкости к износу и термоударам.

Впервые футеровка стен и дна сталеразливочного ковша была изготовлена из глинозе-

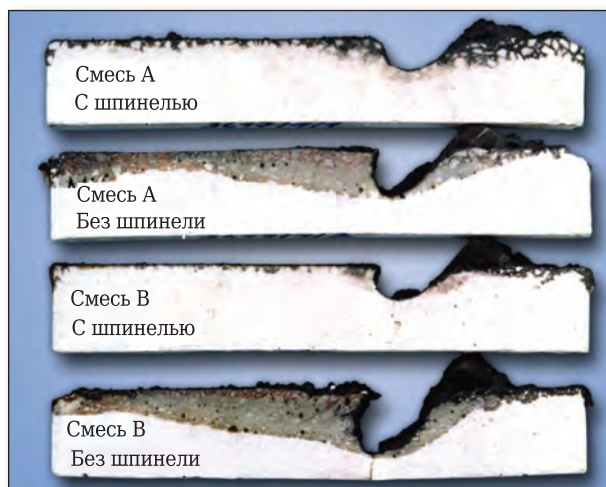


Рис. 3. Образцы бетона после испытаний на шлакоустойчивость в индукционной печи (5 ч при 1650 °C)

мошпинельного бетона в Японии в 1990-е годы. Впоследствии монолитная футеровка сталеразливочного ковша получила широкое распространение в этой стране, за исключением шлакового пояса, который изготавливается из периклазоуглеродистых материалов. Затем появились шпинелеобразующие бетоны, которые доказали свою эффективность прежде всего в футеровке стен сталеразливочного ковша [4, 5].

Изначально в Европе и Северной Америке монолитную футеровку сталеразливочного ковша выполняли из бетонов на основе боксита или шпинелеобразующих бетонов, изготовленных из глинозема с добавкой периклаза [6]. Позднее боксит был заменен на табулярный глинозем, и обе концепции, шпинелеобразующей и шпинеле-содержащей футеровки, применяются и сегодня [4]. В Европе около 20 % сталеразливочных ковшей имеют монолитную футеровку, но преимущественно в донной зоне.

Переход от кирпичной футеровки дна сталеразливочного ковша к монолитной часто рассматривается как первый этап на пути изменения концепции футеровки на полностью монолитную. За последние годы в СНГ значительно возросла доля ковшей с монолитной футеровкой в донной зоне. При этом Надеждинский металлургический завод уже перешел на полностью монолитную футеровку своих ковшей.

Применение в сталеразливочном ковше монолитной футеровки и технология ее замены имеют ряд преимуществ, которые заключаются в автоматизации и сокращении трудозатрат до 70 %, скорости изготовления футеровки и улучшении эксплуатационных характеристик (Р. Эксенбергер [7] сообщает о стойкости 114 плавов при исходной толщине футеровки стен ковша всего 110–136 мм), а также в снижении удельного расхода огнеупоров в стенах и дне ковша до 0,6–0,8 кг/т стали (без учета шлакового пояса) [7, 8]. Однако переход на монолитную футеровку сталеразливочного ковша требует выполнения ряда условий. Среди них приобретение оборудования: шаблона, смесителя, стенда для сушки и разогрева футеровки. Полезно также наличие лазерного сканера для контроля износа футеровки. Старые ковши с деформированным кожухом непригодны для изготовления монолитной футеровки с использованием шаблона из-за значительных колебаний толщины ее слоя. И последнее, но не менее важное условие: подготовка и квалификация рабочего персонала. Как показывает опыт, успешное внедрение монолитной футеровки сталеразливочных ковшей напрямую зависит от поддержки со стороны руководства; попытки, предпринятые без должной заинтересованности, оказываются неудачными.

Влияние тонкомолотой спеченной шпинели AR 78 на шлакоустойчивость бетона на основе табулярного глинозема показано на рис. 3. Испытания выполнены в индукционной печи при

1650 °С и выдержке 5 ч; основность шлака 2,3. Полученные результаты свидетельствуют об уменьшении глубины пропитки и улучшении устойчивости к износу бетонов со шпинелью.

В прошлом обожженные глиноземошпинельные изделия занимали лишь небольшую нишу в ассортименте огнеупоров для производства стали. Ситуация изменилась в 2000 г., когда Corus (сегодня Tata Steel Europe, г. Эймёйден, Нидерланды) использовала эти изделия взамен андалузитовых для футеровки сталеразливочного ковша [9]. Причиной послужили требования и новые задачи, связанные с началом разлива тонких слябов. Более агрессивные шлаки требовали более стойких огнеупорных материалов, чем андалузит. Отказ от углеродсодержащих материалов в футеровке стен ковшей (за исключением шлакового пояса) был продиктован необходимостью снизить прирост содержания углерода в стали при производстве особонизкоуглеродистых марок. Было установлено также, что низкое содержание SiO_2 в изделиях является обязательным условием их высокой стойкости [9]. В итоге технические задачи были решены за счет перехода на более дорогие глиноземошпинельные изделия, при этом получен положительный экономический эффект благодаря пониженному износу этих изделий и, как следствие, длительному сроку службы при меньшей начальной толщине футеровки (кирпич толщиной 140 мм позволяет достичь стойкости 140 плавов). Поэтому удельные затраты на огнеупоры оказались ниже, чем при использовании андалузитовых изделий [10].

В последние годы обожженные глиноземошпинельные изделия успешно внедряются на металлургических заводах Индии взамен периклазоуглеродистых, за исключением зоны шлакового пояса [11], благодаря их стабильному качеству и высокой стойкости. В табл. 1 по-

Таблица 1. Повышение стойкости футеровки сталеразливочных ковшей на предприятии Tata Steel Jamshedpur

Показатели	ККЦ № 2	ККЦ № 3
Вместимость ковша, т	165	
Основность шлака $\text{C} / (\text{A} + \text{S})$	1,4	1,6
Обработка кальцием	Нет	Да
Длительность пребывания металла в ковше (средняя), мин	75	150
Материал (толщина) из-рабочего слоя футеровки старого типа	Периклазоуглеродистые изделия (150 мм)	
Срок службы футеровки старого типа, плавки	100	75
Материал (толщина) рабочего слоя футеровки нового типа	Обожженные глиноземошпинельные изделия (150 мм)	
Срок службы футеровки нового типа, плавки	150	100

казано повышение стойкости футеровки сталеразливочных ковшей на предприятии Tata Steel Jamshedpur: от 100 до 150 плавов в ККЦ № 2, от 75 до 100 плавов в ККЦ № 3. Поддержкой этой концепции футеровки сталеразливочных ковшей служат растущие требования к качеству автомобильной стали в Индии.

ФАКТОРЫ, СОСТАВЛЯЮЩИЕ ОБЩИЕ ЗАТРАТЫ НА ЭКСПЛУАТАЦИЮ

Увеличение вместимости сталеразливочного ковша

Вместимость сталеразливочного ковша часто относят к факторам, ограничивающим производительность металлургического производства, поскольку она определяет размер партии металла, поступающего на обработку. Поэтому вопросу увеличения вместимости ковша всегда уделялось особое внимание. На рис. 4 показано, как в Европе изменилась толщина рабочего и арматурного слоев футеровки сталеразливочных ковшей за последние 25 лет. При условии успешной реализации дополнительных объемов стали увеличение вместимости ковша имеет огромное влияние на экономическую эффективность металлургического производства [12].

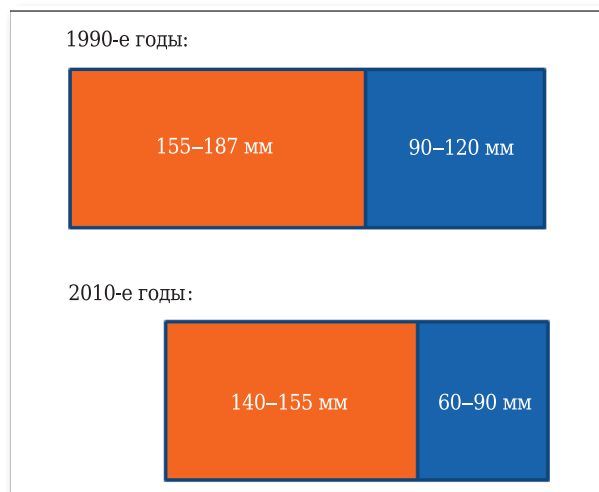


Рис. 4. Толщина рабочего (■) и арматурного (■) слоев футеровки сталеразливочного ковша в 1990-е и 2010-е годы

Высокая стойкость глиноземошпинельной футеровки позволяет уменьшить толщину ее рабочего слоя. Этот фактор стал определяющим для внедрения такой футеровки, например, на Voestalpine Stahl, г. Линц, Австрия [7], и Tata Steel Europe [10].

Снижение прироста содержания углерода в стали

Современные требования зачастую ограничивают максимальное содержание углерода в осо-

бонизкоуглеродистой стали на уровне 30 мг/кг. Поэтому прирост содержания углерода в стали в результате контакта с рабочим слоем футеровки при внепечной обработке приобретает критический характер, так как разница в приросте 2–3 мг/кг может иметь решающее значение для достижения целевых показателей. В связи с этим качество футеровки также принимается во внимание наряду с такими технологическими параметрами, как длительность пребывания жидкой стали в ковше и перемешивание после обезуглероживания.

Глиноземошпинельные материалы служат альтернативой огнеупорам, содержащим углерод и особенно графит, например периклазоуглеродистым (табл. 2). Анализ статистических данных металлургических предприятий, полученных при сравнении футеровки периклазоуглеродистого и глиноземошпинельного составов со шлаковым поясом из периклазоуглеродистых изделий в обоих случаях, свидетельствует о снижении прироста содержания углерода в особонизкоуглеродистой стали [7]. Поэтому глиноземошпинельная футеровка сталеразливочного ковша для производства этого вида стали является предпочтительной.

Экономия энергоресурсов

Сравнительное снижение температуры жидкой стали в 180-т сталеразливочном ковше с футеровкой стен из периклазоуглеродистых изделий и шпинелеобразующего бетона пока-

Таблица 2. Характеристика ковшевых огнеупоров

Показатели	Периклазоуглеродистые изделия	Глиноземошпинельные	
		изделия	бетоны
Массовая доля углерода, %	5–10	–	–
Теплопроводность, Вт/(м·К)	8–10	3,5	3,5
Кажущаяся плотность, г/см ³	2,9	3,0–3,2	2,9–3,0

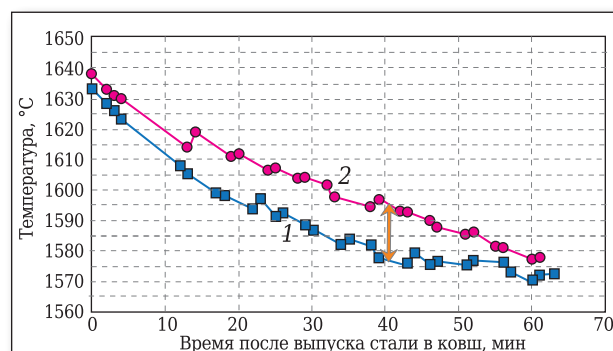


Рис. 5. Снижение температуры жидкой стали при ее выдержке без обработки более 60 мин [7] в сталеразливочном ковше с футеровкой стен из периклазоуглеродистых изделий (1) и глиноземошпинельного бетона (2)

зано на рис. 5. В ковше с футеровкой из периклазоуглеродистых изделий, несмотря на дополнительный слой теплоизоляции, снижение температуры жидкой стали на 10–15 К выше, чем при использовании футеровки из глиноземошпинельного бетона. Это обусловлено высокой теплопроводностью периклазоуглеродистых изделий (см. табл. 2). Учитывая, что один градус снижения температуры жидкой стали оценивается 5–10 евроцентами [13, 14], то вышеуказанные 15 К в стоимостном выражении составляют 0,75–1,5 евро/т стали. Обычно затраты на огнеупоры для сталеразливочного ковша без учета изделий для шибера зазора оценивают на уровне 1,5–2 евро/т стали. Поэтому убытки от тепловых потерь в ковше могут превысить 50 % от общих затрат на огнеупоры!

Применение глиноземошпинельных огнеупоров имеет очевидное преимущество перед основными огнеупорами (с высоким содержанием углерода) в виде более низкой теплопроводности. Такие особенности следует учитывать при экономической оценке разных концепций футеровки сталеразливочного ковша.

РЫНОЧНЫЕ ТЕНДЕНЦИИ

Рассмотренные концепции глиноземошпинельной футеровки для сталеразливочных ковшей предполагают использование синтетических сырьевых материалов, изготовленных на основе получаемого по способу Байера глинозема. Бокситовая руда, перерабатываемая этим способом, отличается от огнеупорных бокситов. Она содержит значительно меньше оксида алюминия и относится к металлургическому сорту, поскольку большая часть глинозема, извлекаемого из боксита по способу Байера, потребляется алюминиевой промышленностью и лишь небольшой процент перерабатывается в продукцию с более высокой добавленной стоимостью для производства огнеупоров и других областей применения.

Китай поставляет на мировой рынок 2–3 млн т/год огнеупорных бокситов, занимая лидирующую позицию. Это небольшой объем на фоне емкости мирового рынка металлургического боксита, который в 2016 г. составил около 262 млн т. Любопытно, что на Китай приходится лишь 3 % от мировых запасов боксита [15] и миллионы тонн боксита, закупаемого ежегодно по импорту для обеспечения внутреннего производства глинозема и алюминия. Основные запасы бокситовых руд сосредоточены в Гвинее, Австралии и Бразилии [15]. Следовательно, поставки бокситового сырья для производства синтетического глинозема не зависят от Китая. Вместе с тем Китай занимает лидирующие позиции по поставкам высококачественного плавящего и спеченного периклаза [16], востребо-

ванного в футеровке сталеразливочного ковша. Изменения политики Китая в части охраны окружающей среды, оптимизации структуры добычи и переработки магнезита с целью продлить время эксплуатации месторождений привели к дефициту поставок и росту цен на сырье до 300 %. С начала текущего года цены на периклаз несколько снизились, но вряд ли приблизятся к уровню 2017 г. [16].

Библиографический список

1. World steel association, 50 years anniversary report, www.50years-worldsteel.org.
2. **Buhr, A.** Trends in clean steel technology and refractory engineering / A. Buhr, R. Bruckhaus, R. Fandrich // RWF. — 2016. — Vol. 8, № 1. — P. 57–63.
3. **Kriechbaum, G. W.** Neue Spinell-Rohstoffe für Feuerfestauskleidungen im Stahlbereich / G. W. Kriechbaum, G. Routschka, C. Wöhrmeyer // 35th International Colloquium on Refractories, Aachen, Germany, 1992.
4. **Schnabel, M.** Spinel: In-situ versus preformed — clearing the myth / M. Schnabel, C. Rampitsch, A. Buhr [et al.] // RWF. — 2010. — Vol. 2, № 2. — P. 87–93.
5. **Braulio, M.** Spinel containing alumina based refractory castables / M. Rigaud, A. Buhr [et al.] // Ceram. Int. — 2011. — Vol. 37, № 6. — P. 1705–1724.
6. **Buhr, A.** Refractories for steel secondary metallurgy / A. Buhr // CN-Refractories. — 1999. — Vol. 6, № 3. — P. 19–30.
7. **Exenberger, R.** Steel ladle lining at Voestalpine Stahl GmbH Linz / R. Exenberger // Presentation at International Symposium Steel Ladle Lining, Steel Academy, Hannover / Germany 2012 and Mönchengladbach / Germany, 2016.
8. **Vatanen, J.** SSAB Europe Oy: Steel ladle lining practice in Rahe, Finland / J. Vatanen // Presentation at International Symposium Steel Ladle Lining, Steel Academy, Mönchengladbach / Germany, 2016.
9. **Franken, M. C.** New refractory lining for steel ladle BOS no. 2 Corus Ijmuiden / M. C. Franken, R. Siebring,

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что изготовленная из глиноземошпинельных материалов футеровка сталеразливочного ковша является надежной и экономически эффективной. Помимо технических преимуществ применение этих материалов позволяет также уменьшить толщину футеровки, увеличив тем самым вместимость сталеразливочного ковша, повысить качество стали и снизить потери энергии.

- T. W. M. de Wit // UNITECR'01, Cancun/Mexico. — Vol. I. — P. 128–138.
10. **Peekel, M.** Tata Steel Ijmuiden: Steel ladle lining — current design and recent developments / M. Peekel // Presentation at International Symposium Steel Ladle Lining, Steel Academy, Mönchengladbach / Germany, 2016.
11. **Chatterjee S.** Effectiveness of fired alumina-spinel brick in secondary metallurgy / S. Chatterjee, A. Buhr, A. Pal, B. Singh // UNITECR'17, Santiago/Chile. — Paper № 76.
12. **Siebring, R.** Economics in refractory usage / R. Siebring, A. Buhr // Presentation at seminar Refractory Technology from Steel Academy, Cologne/Germany, 22–25 April 2018.
13. www.steeluniversity.org.
14. Refractory committee meeting German Steel Institute VDEh, Ijmuiden, Netherlands, April 2014.
15. US geological survey, www.minerals.usgs.gov/minerals/.
16. **O'Driscoll, M.** Key note lecture: Refractory magnesite supply update / M. O'Driscoll // IRECON 2018, Delhi/India. ■

Получено 12.04.19

© С. Клаус, А. Бур, Дж. Даттон, 2019 г.

Пер. — А. С. Киселёв

(Кофермин Роштоффе ГмбХ и Ко. КГ), 2019 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Held under the patronage of His Royal Highness Prince Khalifa bin Salman Al Khalifa, The Prime Minister of the Kingdom of Bahrain



Hosted by



Aluminium for the world

19–21 ноября 2019 г. Манама, Бахрейн

Shaping the future of Aluminium in the Arab Region

23-я Арабская международная конференция по алюминию




www.arabal.com