

Э. М. Манашева¹, к. т. н. И. Р. Манашев² (✉), д. т. н. М. Х. Зиатдинов³,
к. т. н. И. В. Макарова¹

¹ ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет имени Г. И. Носова», г. Магнитогорск, Россия

² ООО «НТПФ «Эталон», г. Магнитогорск, Россия

³ ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет», г. Томск, Россия

УДК 669.15'782-198:666.322]:669.162.216

ОПЫТ РАЗРАБОТКИ И ПРИМЕНЕНИЯ СВС-НИТРИДА ФЕРРОСИЛИЦИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ СТОЙКОСТИ ЛЕТОЧНЫХ МАСС ДЛЯ ДОМЕННЫХ ПЕЧЕЙ

Представлен опыт разработки и получения композиционного нитрида ферросилиция методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС). В условиях ООО «НТПФ «Эталон» проведены исследования по азотированию в режиме горения порошков ферросилиция стандартных марок в лабораторном и промышленном СВС-реакторе. На базе металлургического СВС-процесса разработана технология производства композиционного нитрида ферросилиция, превосходящего по свойствам продукт печного синтеза. Представлены результаты промышленных испытаний отечественных леточных масс с добавкой СВС-нитрида ферросилиция при использовании в доменных печах ПАО ММК объемом 2000 м³.

Ключевые слова: самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС), азотированные ферросплавы, металлургический СВС, композиционный нитрид ферросилиция, леточная масса.

Явление волновой локализации автотормозящихся твердофазных реакций, обнаруженное советскими учеными А. Г. Мержановым, И. П. Боровинской, В. М. Шкиро в 1967 г. открыло новые возможности для получения тугоплавких неорганических соединений (карбидов, силицидов, нитридов и др.), а также композиционных материалов на их основе [1–3]. Новый метод, названный самораспространяющимся высокотемпературным синтезом (СВС), был предложен в качестве альтернативы печной технологии получения тугоплавких материалов. СВС отличается минимальными энергозатратами, так как процесс в большинстве случаев протекает за счет «собственной» теплоты экзотермических реакций. Продукты СВС, в отличие от материалов, получаемых традиционным печным синтезом, имеют композиционную структуру, которая образуется в результате прохождения в объеме шихты высокотемпературного фронта горения (где температура может достигать 2500 °С и более)

и последующего структурообразования продукта в условиях большого градиента температур и высокой скорости охлаждения. Уникальность свойств синтезируемых продуктов интересна для решения металлургических задач, связанных с получением и обработкой большой массы высокотемпературных расплавов (чугуна, стали, цветных металлов и их шлаков). Перспективной является возможность улучшения качества огнеупорных материалов для доменного, сталеплавильного, коксохимического и других переделов, а также создание высокоэффективных композиционных легирующих сплавов для выплавки сталей и сплавов.

Большой вклад в развитие научных основ классической СВС-технологии применительно к получению сплавов и лигатур для металлургического производства внес М. Х. Зиатдинов, предложивший так называемый металлургический СВС [4, 5]. В таком варианте синтеза основными шихтовыми компонентами для получения СВС-продуктов являются широко применяемые в сталеплавильном производстве соединения — ферросплавы, раскислители, технические металлы и другие материалы, а процесс твердопламенного горения осуществляется за счет обменных экзотермических бескислородных реакций [6]. В частном случае получения нитридов ферросплавов и лигатур синтез реализуется



И. Р. Манашев
E-mail: mirney@yandex.ru

в системе твердое – газ, где одним из реагентов является азот.

СВС реализуется здесь в режиме фильтрационного горения, при котором избыточное давление реагирующего газа играет большую роль для его успешного протекания, так как фильтрация азота осуществляется за счет самопроизвольно поддерживающегося перепада давлений, возникающего при поглощении азота в зоне горения. При этом состав и структура синтезируемых продуктов сильно зависят от проницаемости шихты, размеров частиц исходного порошка, массы азотируемой смеси, добавки в шихту технологических разбавителей, их состава, уровня исходного разогрева шихтовой смеси [7, 8]. Закономерности фильтрационного режима горения кремния в азоте были изучены в статье [9]. Очевидно, что закономерности горения FeSi будут близки. FeSi плавится при более низких температурах, чем Si. Сплавы, содержащие от 40 до 80 % Si, начинают плавиться при нагреве выше 1210 °С. Поэтому сильнее будут проявляться эффекты, обусловленные образованием эвтектической фазы.

Для выявления закономерностей СВС-нитрида ферросилиция проведены экспериментальные исследования в лабораторном СВС-реакторе высокого давления (рис. 1) на производственной базе НТПФ «Эталон». В качестве исходных материалов для азотирования использовали порошки ферросилиция стандартных марок по ГОСТ 1415–93 (табл. 1). Для выделения порошков нужной дисперсности осуществляли размол на лабораторной вибромельнице с твердосплавной гарнитурой и рассев намолотого продукта на стандартных ситах. Проведены исследования с циклонной пылью ферросилиция (продукт улавливания при дроблении — ПУД),

образующейся при дроблении слитков ферросилиция, с целью ее возможной переработки СВС-методом. Утилизация ПУД FeSi остается большой проблемой для отечественных производителей. Субмикронный размер такого продукта делает малоэффективным его повторное использование в плавке, так как при загрузке в печь окускованного материала большая его часть сгорает и попадает в газоочистку [10].

Для азотирования использовали азот газообразный чистой 99,98 %. Для опытов изготавливали формованные и неформованные цилиндрические образцы двух видов. В первом случае образцы получали прессованием на одноосном прессе, во втором — порошок ферросплава засыпался в газопроницаемый контейнер из стальной сетки. Температуру горения T_f измеряли с помощью термопар ВР5/ВР20. Спай термопары помещали в центр образца на глубину ~15 мм от низа.

На рис. 2 показаны зависимости T_f и скорости горения V_f , а также количества азота в продуктах синтеза от концентрации Si в исходном FeSi. С увеличением в сплаве содержания Si повышается его активность — FeSi интенсивнее реагирует с азотом, в результате чего значительно растет V_f . Также увеличивается концентрация азота в продуктах горения (см. рис. 2, а), в то время как доля Si, превративше-

Таблица 1. Состав исходного ферросилиция ГОСТ 1415–93

Марка	Элементный состав, мас. %						Фазовый состав
	Si	C	S	P	Al	Mn	
ФС 75	75,6	0,09	0,01	0,02	1,3	0,4	Si, FeSi ₂
ФС 70	72,5	0,17	0,01	0,02	1,2	0,3	Si, FeSi ₂ , FeSi
ФС 65	66,9	0,12	0,01	0,02	1,4	0,3	FeSi ₂ , FeSi
ФС 45	46,1	0,21	0,01	0,03	1,0	0,8	FeSi, FeSi ₂

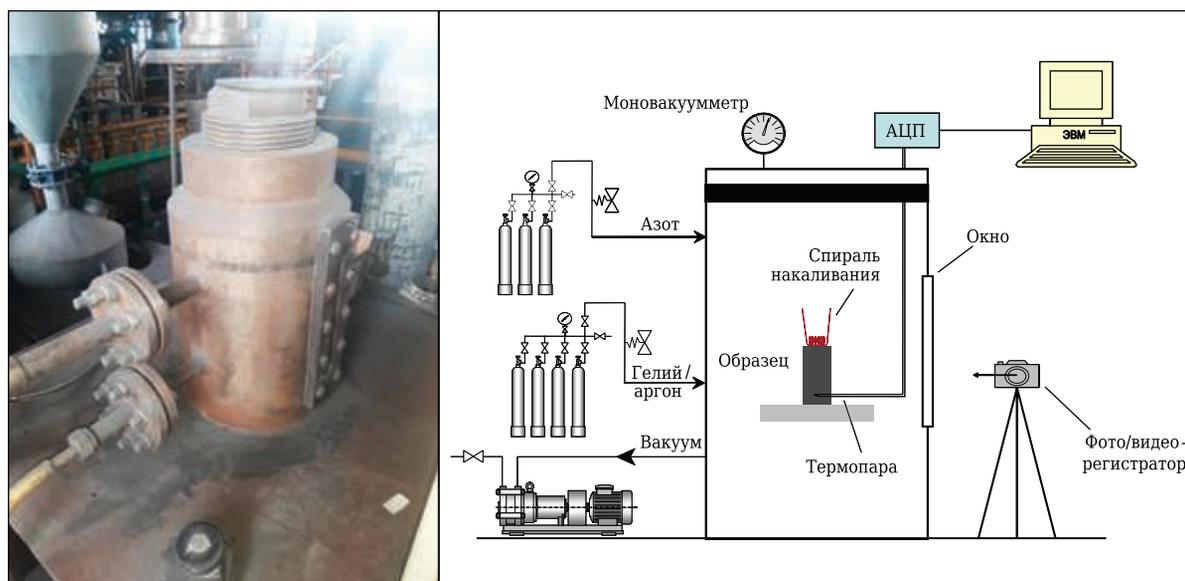


Рис. 1. Лабораторный СВС-реактор высокого давления

гося в нитрид, снижается по мере уменьшения в сплавах содержания Fe. Повышение давления азота приводит к незначительному увеличению T_f ферросилициевых сплавов. При более высоком содержании Si в FeSi большее количество азота фиксируется в продуктах горения. Повышение давления азота от 4 до 10 МПа приводит к увеличению T_f всех марок FeSi (см. рис. 2, б), при этом степень превращения кремния в нитрид в данном диапазоне давлений далека от стехиометрических значений (см. рис. 2, а).

Разогрев, достигаемый при горении FeSi в азоте, много выше его температуры плавления. Температура начала плавления FeSi марок ФС65 и ФС75 около 1200 °С, при температуре 1300–1350 °С они полностью превращаются в расплав. Анализ микроструктуры не полностью сгоревших образцов подтверждает, что в волне горения происходит интенсивная коагуляция расплавленных частиц FeSi. Реакционная поверхность в результате этого уменьшается, что приводит к неполному превращению $Si \rightarrow Si_3N_4$.

Азотирование ферросилиция происходит относительно медленно: при давлении азота 4 МПа V_f составляет 0,14–0,27 мм/с, а при давлении 10 МПа — 0,4–0,54 мм/с (см. рис. 2, в). Причиной этого являются низкая растворимость азота в твердом и жидком Si, низкая диффузионная подвижность атомов кремния и азота, низкая

теплопроводность Si_3N_4 и железокремнистых сплавов. Чем больше размер частиц исходного сплава, тем меньшее количество азота фиксируется в продуктах горения вследствие неполного перехода Si в Si_3N_4 .

Фильтрация азота создается за счет разности давлений в реакционной зоне и внешнем пространстве. Азот непрерывно поглощается, и давление в зоне реакции снижается. Таким образом, реакционная зона действует как химический насос, закачивающий газ в волну горения. Чем больше пористость, тем эффективнее фильтрация, тем лучшие условия создаются для горения. Чтобы возникла стадия доазотирования, необходимо, чтобы во время горения сохранились проницаемость образцов и неполнота перехода Si в Si_3N_4 непосредственно в волне синтеза. Пористость продуктов горения составляет 35–55 %. Анализ химического состава образцов, закаленных резким прерыванием горения, позволил обнаружить, что при дореагировании происходит значительное увеличение концентрации в них азота. Большой вклад стадии доазотирования является причиной слабой зависимости от давления азота его содержания в продуктах горения

Основной фазой, содержащейся в нитриде ферросилиция, является $\beta-Si_3N_4$. Заметных количеств $\alpha-Si_3N_4$ не обнаружено. На фазовый

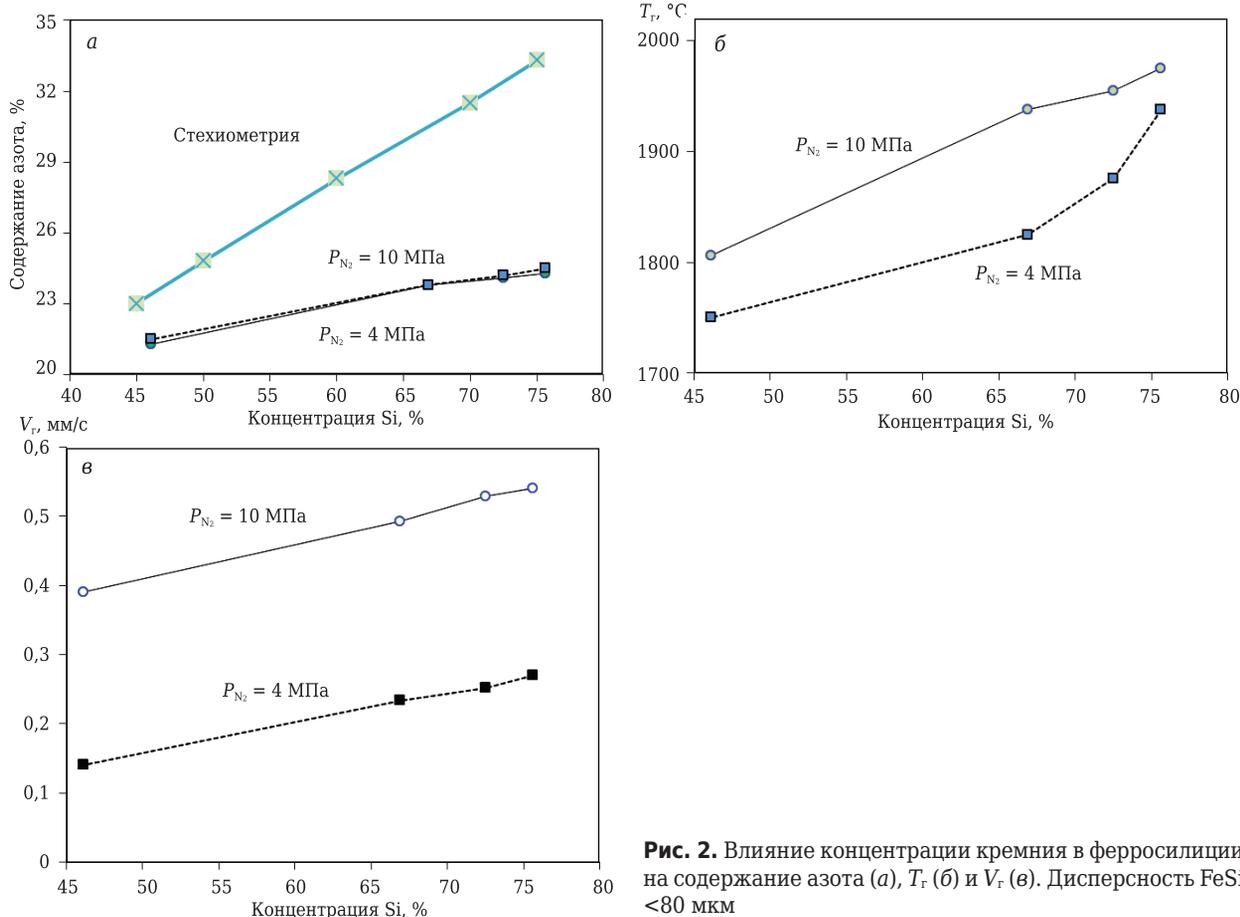


Рис. 2. Влияние концентрации кремния в ферросилициде на содержание азота (а), T_f (б) и V_f (в). Дисперсность FeSi <80 мкм

состав наибольшее влияние оказывает количество Si, превратившегося в нитрид ($\text{Si} \rightarrow \text{Si}_3\text{N}_4$). После азотирования в режиме горения образуется композиционный продукт, основу которого составляет $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ (60–80 %). При полном превращении Si в Si_3N_4 связкой для него будет служить $\alpha\text{-Fe}$, а при частичном — его силициды. Вследствие большого содержания Si в исходном сплаве и большой разницы в плотностях основных его компонентов (Si и Fe) в продукте, синтезированном из сплава марки ФС75, объемная доля нитрида составляет более 90 % (рис. 3). При этом Fe распределено по объему в виде отдельных островков размером до 100–200 мкм. Образование их происходит вследствие слияния расплава Fe и его силицидов.

Установлено, что СВС-метод позволяет синтезировать композиционный сплав на основе Si_3N_4 , используя в качестве исходных компонентов стандартные марки FeSi. Основу азотированного продукта составляет термостабильный $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ со связкой из Fe и его силицидов.

Полученные лабораторные данные были использованы при промышленном выпуске композиционного нитрида ферросилиция на производственной базе НТПФ «Эталон». Мощности созданного производства СВС-нитрида ферросилиция и других композиционных материалов составляют 5000 т/год, что позволяет обеспечить потребности отечественных металлургических заводов. Первоначально композиционный нитрид ферросилиция использовали при выплавке трансформаторной стали нитридного ингибирования в ПАО ММК. Одной из наиболее трудных задач при освоении технологии выплавки данной марки стали в конвертерном цехе ПАО ММК было обеспечение в составе металла повышенной концентрации азота в довольно узких пределах [11]. Исходя из химического состава трансформаторной стали можно заключить, нитрид ферросилиция оказался идеальным азотсодержащим легирующим материалом. Предшествующие попытки использования газового азотирования в процессе плавки, а также других материалов — носителей азота (карбамид, азотированный феррохром) не приводили к успеху ввиду нестабильного усвоения азота, что было главным недостатком данных способов азотирования наряду с другими. Удачным решением данной проблемы стало применение композиционного нитрида ферросилиция марки NITRO-FESIL® A N25 производства НТПФ «Эталон» (табл. 2). По разработанной технологии легирующий материал использовали в кусковом виде для предварительного насыщения стального полупродукта азотом при выпуске плавки из конвертера. В процессе внепечной обработки содержание азота корректировали порошковой проволокой с наполнителем из этого же материала. Такая технология легирования обеспечила

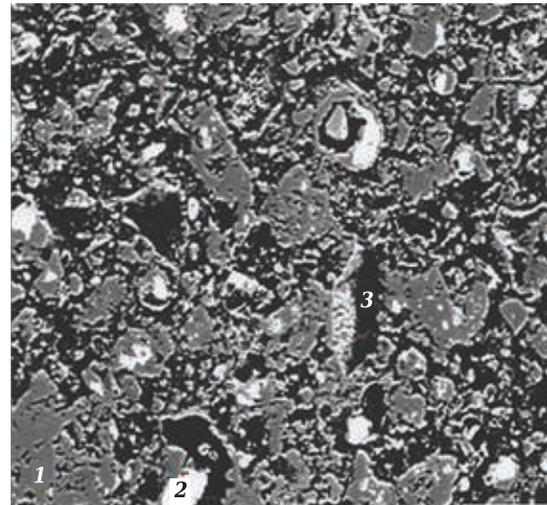


Рис. 3. Микроструктура СВС-нитрида ферросилиция: 1 — $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$; 2 — Fe и силициды Fe, Si; 3 — поры. $\times 300$

стабильное содержание азота в готовом металле в пределах 0,009–0,011 % и была принята к промышленному использованию. Внедрение технологии легирования трансформаторной стали азотом при помощи композиционного нитрида ферросилиция существенно повысило выход листов высшей категории качества и их магнитные свойства по сравнению с ранее применявшимися способами азотного легирования стали.

В настоящее время ПАО НЛМК, используя опыт ПАО ММК, при выплавке трансформаторной стали в кислородно-конвертерном цехе для получения марочного содержания азота применяет порошковую проволоку с композиционным азотированным ферросилицием марки NITRO-FESIL® A в качестве наполнителя. Использование такой порошковой проволоки для корректировки концентрации азота в составе электротехнической анизотропной стали позволило:

- уменьшить разброс значений содержания азота в готовом металле;
- ограничить выраженность дефектов поверхности листов, характерных для металла с концентрацией азота более 0,012 %;
- стабилизировать и улучшить уровень магнитных свойств готовых листов за счет исключения значений концентрации азота менее 0,009 %;
- исключить использование импортных азотированных материалов, которые, несмотря на большую стоимость, часто не обеспечивали стабильное содержание азота в готовой стали.

Таблица 2. Химический состав композиционного нитрида ферросилиция производства НТПФ «Эталон» ТУ 1517-059-21600649–2016 с изм. № 2

Марка	Массовая доля, %					
	N	Si	Al	Ti	C	O
NITRO-FESIL® A N25	27,5	49,8	0,5	0,13	0,11	0,6
NITRO-FESIL® TL	30,8	52,5	1,0	–	0,4	1,0

Наряду с довольно успешным применением композиционного нитрида ферросилиция при выплавке азотсодержащих сталей было предложено также опробовать его в огнеупорном производстве. За рубежом уже есть положительный опыт использования железистого нитрида кремния при изготовлении неформованных огнеупоров для доменного производства [12, 13]. В результате последующих экспериментальных исследований установлено, что нитрид ферросилиция обладает способностью резкого повышения прочностных свойств леточной массы в процессе ее службы.

Летка и околлеточное пространство доменной печи подвергаются наиболее сильному воздействию расплавов чугуна и шлака. Леточная масса наряду с обычным корродирующим разрушением жидким металлом и шлаком подвергается мощному эрозионному воздействию продуктами плавки, а также термическому удару. В связи с этим качество современной леточной массы должно быть на самом высоком уровне. Развитие леточных масс шло вслед за развитием технологии выплавки чугуна. Чем больше становились размеры печей и совершеннее их конструкция и чем более интенсивным становился сам процесс плавки, тем более высокие требования стали предъявляться к качеству леточных масс. Современная леточная масса должна выполнять три главных функции (рис. 4). Если несколько десятилетий назад ее роль сводилась лишь к закупорке летки после выпуска чугуна и шлака, то в настоящее время леточная масса дополнительно позволяет защищать от разрушения внутреннее околлеточное пространство горна и управлять скоростью и продолжительностью выпуска, оптимизируя работу всей доменной печи и увеличивая срок ее эксплуатации. Леточная масса должна довольно

быстро спекаться после нагнетания в канал, а при выпуске плавки обеспечить вскрываемость летки одним-двумя бурами и гарантировать безопасный и спокойный выпуск без выбросов. При этом удельный расход леточной массы должен быть минимальным.

Компоненты современных леточных масс можно выделить в три основные группы:

- крупные огнеупорные заполнители (<5 мм) — корунд и кремнеземсодержащие материалы, карбид кремния, кокс и другие. Данные компоненты слабо взаимодействуют как друг с другом, так и с продуктами плавки;
- связующие тонкомолотые компоненты — глина и мелкодисперсные порошки огнеупорных материалов. Основная роль этих компонентов заключается в том, чтобы связать между собой крупнодисперсные составляющие и создать прочный каркас леточной массы. Происходит это как за счет механизма твердофазного припекания мелких частиц друг к другу, так и за счет образования кристаллов вторичного карбида кремния за счет восстановления кремнезема углеродом;

– пластификаторы — смолы синтетического происхождения, ответственные за придание необходимого уровня пластичности леточной массе. Масса должна не только равномерно заполнить канал летки, но и сформировать защитный леточный грибок на внутренней поверхности горна.

Нитрид кремния начал впервые использоваться в составе леточных масс в Японии. Было замечено, что благодаря его использованию достигается повышенная прочность и износостойкость леточного канала, стойкость к окислению, снижается ТКЛР при одновременном росте теплопроводности. В результате термического разложения $FeSi_3N_4$ протекают реакции с участием продуктов разложения и других компонентов леточной массы, в особенности с углеродом:

Температура начала реакции, °C	Реакция
<1000.....	$4Fe + 3O_2 (H_2O) \rightarrow 2Fe_2O_3$
~1100.....	$Fe_2O_3 + 3C \rightarrow 2Fe + 3CO$
~1200.....	$\beta-Si_3N_4 + 9Fe \rightarrow 3Fe_3Si + 2N_2$
~1300.....	$\beta-Si_3N_4 + 3Fe \rightarrow 3FeSi + 2N_2$; $FeSi + C \rightarrow Fe + SiC$
~1400.....	$\beta-Si_3N_4 + 3Fe + C \rightarrow 3Fe_3Si + 2N_2 + 2SiC$; $\beta-Si_3N_4 + 9Fe + Al_2O_3 + C \rightarrow AlN + 3Fe_3Si + 2N_2 + 3CO$

В результате таких реакций образуется вторичный карбид кремния, который резко увеличивает прочностные свойства огнеупора, его стойкость к эрозионному и химическому воздействию чугуна и шлака. Легкоплавкие ферросилициды ($t_{пл} \sim 1200 \text{ }^\circ\text{C}$) служат здесь своего рода катализатором реакции карбидообразова-



Рис. 4. Основные функции леточной массы

ния, что важно для упрочнения леточного канала в самый начальный момент выпуска плавки.

С целью улучшения служебных свойств леточной массы собственного изготовления в ПАО ММК были проведены исследования по применению в ее составе композиционного нитрида ферросилиция марки NITRO-FESIL® TL (см. табл. 2) в качестве упрочняющей добавки. Для проведения сравнительных испытаний физико-механических свойств были изготовлены лабораторные образцы традиционного и опытного составов (табл. 3).

Первоначально смешивали твердые порошковые компоненты на лабораторном смесителе «Турбула 2.0», после чего добавляли подогретую до ~50 °С каменноугольную смолу и осуществляли окончательное мокрое перемешивание. Образцы формовали на двухосном прессе под давлением 200 кг/см², что соответствует усилию нагнетания леточной массы гидравлической пушкой при закрытии летки. Лабораторные испытания образцов опытной массы с добавкой 7,5 % NITRO-FESIL показали, что она обладает повышенными механическими свойствами по сравнению с обычным составом: предел прочности при сжатии составил 9,4–9,6 в сравнении с 7,9 Н/мм². После коксующегося обжига при 1100 °С образцы леточной массы опытного состава имели следующие свойства: усадка 1,8–2,7 %, кажущаяся плотность 1,4–1,5 г/см³, пористость 38,0–39,8 %.

С целью изучения физико-химических превращений, происходящих в процессе службы ле-

точной массы (60 т) в доменном цехе на печи № 9 объемом 2000 м³. Сравнительные результаты испытаний представлены в табл. 4. Опытная леточная масса обеспечивала надежное закрытие чугунных леток, спокойный режим и стабильные параметры выпусков. В процессе испытания разгара летки по длине и диаметру канала во время выпусков не наблюдалось. Средняя продолжительность выпуска увеличилась от 46,8–51,0 до 54,0–65,9 мин. Отмечено снижение газовыделений на 15–20 % в районе чугунных леток, что также способствовало равномерному выходу чугуна и шлака по леткам и ровной высокопроизводительной работе доменной печи.

В связи с более высокой прочностью опытной леточной массы отмечен повышенный расход буров от 1,34 до 1,70 штуки на вскрытие. В то же время высокая стойкость леток обеспечила снижение удельного расхода массы от 0,56 до 0,41 кг/т, в связи с чем леточная масса с нитридом ферросилиция была рекомендована к серийному применению на всех доменных печах ПАО ММК.

С целью изучения физико-химических процессов, происходящих в процессе службы леточной массы, провели отбор пробы опытной леточной массы из леточного канала во время капитального ремонта ДП № 4 (рис. 6). Проведенный рентгенофазовый анализ показал отсутствие в составе пробы нитрида ферросилиция, мас. %: SiC 42,2, C 40,9, Al₂O₃ 11,7, FeSi₃ 2,3, SiO₂ 1,0, Al₂SiO₅ 0,7. Результаты анализа доволь-

Таблица 3. Составы безводной леточной массы ПАО ММК

Состав	Массовая доля, %							
	кокс	пек	шамот	УСК	глина	смола к/у	SiC	FeSi ₃ N ₄
Традиционный	12,8	6,0	15,2	17,5	20,5	20,0	8,0	--
Опытный	11,9	6,0	11,5	16,0	19,1	20,0	8,0	7,5

точной массы, и выявления механизма влияния нитрида ферросилиция провели эксперименты в доменном цехе на литейном дворе доменной печи № 4. Заранее подготовленные образцы леточной массы помещали в песчаные лунки на литейном дворе, после чего во время выпуска плавки образцы заливали чугуном и шлаком. После остывания термообработанные образцы разрезали на установке гидроабразивной резки и проводили рентгенофазовый анализ. Проведенные исследования показали отсутствие в составе образцов нитрида кремния, в то же время были обнаружены значительная концентрация углерода и карбид кремния (рис. 5). Очевидно, в результате термического разложения нитрида кремния и последующих реакций с участием углерода и ферросилицидов произошла трансформация Si₃N₄ во вторичный SiC.

Следующим этапом были проведены испытания опытно-промышленной партии новой ле-



Рис. 5. Схема исследований образцов леточной массы с нитридом ферросилиция

Таблица 4. Сравнительные результаты испытаний безводных леточных масс в доменном цехе ПАО ММК

Показатель	Тип массы (см. табл. 3)	
	традиционная	опытная (7,5 % FeSi ₃ N ₄)
Содержание кремния в чугуне, %	0,5–0,6	
Соотношение CaO/SiO ₂	0,98–1,07	
Длительность выпуска, мин	46,8–51,0	54,0–65,9
Время выдержки пушки после закрытия, мин	20–25	20–25
Длина летки	Нестабильная	Стабильная (2–2,2 м)
Количество буров на одно открытие летки	1,34	1,70
Количество шлака за выпуск, чаш	2,2–2,9	2,5–3,8
Количество чугуна за выпуск, т	181,2–260,0	230,5–374,0
Удельный расход массы, кг/т чугуна	0,56	0,41

но точно согласуются с результатами, полученными в ходе экспериментов, проведенных ранее на литейном дворе ДП № 4 (см. рис. 5). Улучшение прочностных свойств леточной массы в результате применения нитрида ферросилиция заключается в трансформации Si₃N₄ → SiC при участии ферросилицидов и углерода.

В настоящее время композиционный нитрид ферросилиция начал использоваться специализированными производителями огнеупорных леточных масс. Освоение производства улучшенных леточных масс с нитридом ферросилиция позволяет отечественным компаниям довольно успешно конкурировать с импортными поставщиками, занимающими большую долю рынка таких огнеупоров. Так, по данным ПАО ММК применение отечественной леточной массы с добавкой композиционного нитрида ферросилиция в первом квартале 2021 г. в доменных печах № 9 и 10 (каждая объемом 2000 м³) показало следующие результаты (средние значения): удельный



Рис. 6. Подготовка к отбору пробы из леточного канала внутри доменной печи № 4 во время капитального ремонта

расход леточной массы 0,32 кг/т (в сравнении с 0,45 кг/т у массы китайского производства), продолжительность выпусков 1 ч 11 мин, расход буров на вскрытие летки ~1,7 шт.

Серийное применение леточных масс с нитридом ферросилиция обеспечивает снижение удельного расхода огнеупора до 50 %. При этом, несмотря на удорожание огнеупора, достигается положительный экономический эффект. Кроме того, улучшаются условия работы персонала: выпуски проходят спокойно, без выбросов, сильного разгара леточного канала в процессе выпуска не происходит, исключаются аварийные ситуации по причине укорачивания длины летки.

Библиографический список

1. **Мержанов, А. Г.** Явление волновой локализации автотормозящихся твердофазных реакций / А. Г. Мержанов, И. П. Боровинская, В. М. Шкиро // Открытие СССР. Диплом № 287 от 05.07.67, Бюл. изобр. — 1984. — № 32. — С. 3; Вест. АН СССР. — 1984. — № 10. — С. 141.
2. **А. с. 255221 СССР.** Способ синтеза тугоплавких неорганических соединений / Мержанов А. Г., Шкиро В. М., Боровинская И. П. — 1967 г.
3. **Мержанов, А. Г.** Самораспространяющийся высокотемпературный синтез тугоплавких неорганических соединений / А. Г. Мержанов, И. П. Боровинская // Докл. АН СССР. — 1972. — Т. 204, № 2. — С. 366–369.
4. **Ziatdinov, M. Kh.** Metallurgical SHS processes as a route to industrial-scale implementation: An autoreview / M. Kh. Ziatdinov // Int. Journal of Self Propagating High-Temperature Synthesis. — 2018. — Vol. 27, № 1. — P. 1–13.

5. **Shatokhin, M.** Nitrided ferroalloy production by metallurgical SHS process: scientific foundations and technology / M. Shatokhin, M. Kh. Ziatdinov, L. A. Smirnov, I. R. Manashev // Theoretical and practical conference with international participation and School for young scientists «Ferroalloys: Development prospects of metallurgy and machine building based on completed Research and Development» // KnE Materials Science. — 2019. — P. 191–206. DOI 10.18502/kms.v5i1.3969.
6. **Ziatdinov, M. Kh.** SHS technology for composite ferroalloys. 1. Metallurgical SHS: nitride of ferrovanadium and ferrochromium / M. Kh. Ziatdinov, I. M. Shatokhin, L. I. Leont'ev // Steel in Translation. — 2018. — Vol. 48, № 5. — P. 269–276.
7. **Мержанов, А. Г.** Научные основы, достижения и перспективы развития процессов твердопламенного

горения / А. Г. Мерзжанов // Изв. РАН. Серия химическая. — 1997. — Т. 46, № 1. — С. 7–31.

8. **Munir, Z. A.** The combustion synthesis of refractory nitrides. Part 1. Theoretical analysis / Z. A. Munir, J. B. Holt // Journal of Materials Science. — 1987. — Vol. 22, № 2. — P. 710–714.

9. **Mukasyan, A. S.** Mechanism and principles of silicon combustion in nitrogen / A. S. Mukasyan, A. G. Merzhanov, V. M. Martinenko [et al.] // Combustion Explosion Shock Waves. — 1986. — Vol. 22, № 5. — P. 534–540.

10. **Kanaev, Yu. P.** Mastering the remelting of ferrosilicon fines to obtain pure ferrosilicon grades and complex modifiers / Yu. P. Kanaev, A. A. Bondarev, V. I. Brylyakov [et al.] // Stal. — 2000. — № 10. — P. 67–70.

11. **Сеничев, Г. С.** Совершенствование технологии выплавки трансформаторной стали в конвертерном цехе ОАО ММК / Г. С. Сеничев, Р. С. Тахаутдинов, Ю. А. Бодяев [и др.] // Сталь. — 2006. — № 3. — С. 17–22.

12. **Kometani, K.** Behavior of ferro-Si₃N₄ in blast furnace tap hole mud / K. Kometani, K. Lizuka, T. Kaga // Taikabutsu. — 1998. — Vol. 50, № 6. — P. 326–330.

13. **Lopes A. B.** The Influence of ferro silicon nitride on the performance of the modern taphole mud for blast furnace / A. B. Lopes // Refractories Applications and News. — 2002. — Vol. 7, № 5. — P. 26–30. ■

Получено 25.07.21

© Э. М. Манашева, И. Р. Манашев,
М. Х. Зуатдинов, И. В. Макарова, 2021 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Петербургская техническая ярмарка (ПТЯ) 2022

26–28 апреля 2022 г.

Санкт-Петербург, КВЦ «ЭКСПОФОРУМ»



В 2022 году в рамках ПТЯ традиционно будет организована актуальная для современной промышленности деловая программа, которая включает Санкт-Петербургский промышленный конгресс, на котором специалисты обсудят новые проекты, технологии, существующие проблемы и перспективы развития отрасли, а также международный конкурс «Лучший инновационный проект и лучшая научно-техническая разработка года», призванный стимулировать деятельность предприятий в области инновационных технологий.

Разделы выставки:

- Металлургия, литейное дело
- Крепеж, метизы, инструмент
- Обработка металлов, машиностроение
- Пластмассы, полимеры, композиты, РТИ
- Охрана труда и средства индивидуальной защиты

ptfair.ru