

УДК 669.168

ИЗУЧЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПЕРЕРАБОТКИ ОТСЕВОВ ФЕРРОВАНАДИЯ В РЕЖИМЕ ГОРЕНИЯ

©2023 г. И.Р. Манашев

ООО «Научно-техническая производственная фирма «Эталон», Магнитогорск
E-mail: mir@ntpf-etalon.ru

Поступила в редакцию 24 ноября 2022 г.

После доработки 31 января 2023 г. принята к публикации 15 февраля 2023 г.

Показана возможность утилизации дисперсных ферросплавов методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) на примере синтеза композиционного нитрида феррованадия при переработке отсевов феррованадия марок FeV50 и FeV80. Установлено, что для получения в продуктах синтеза максимального содержания азота необходимо использовать неформованные образцы с пористостью шихты более 50%, а процесс азотирования осуществлять при давлении реагирующего газа 6—8 МПа.

Ключевые слова: переработка мелких фракций ферросплавов; самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС); циклонные пыли ферросплавов; продукт улавливания от дробления (ПУД); азотированные ферросплавы; отсеvy феррованадия; синтез горением; композиционный нитрид феррованадия.

Ферросплавы играют незаменимую роль в современном сталеплавильном производстве, однако их выпуск сопровождается образованием большого количества техногенных отходов: пылей, шламов, шлаков и прочих материалов, требующих утилизации. Так, при производстве ферросилиция суммарное количество образующихся отходов втрое превышает количество товарного сплава [1]. Актуальной задачей для отечественных ферросплавных заводов остается эффективная переработка ферросплавных пылей и мелких фракций в виде отсевов, просыпей, счисток и пр. Традиционные способы утилизации таких материалов путем окускования и последующего переплава или непосредственного применения брикетов в плавке стали отличаются довольно низкой эффективностью. Как показывает практика, при этом значительная часть материала сгорает или теряется со шлаком [2].

Перспективным способом переработки пылей и отсевов ферросплавов является отечественный метод самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС). Продукты СВС в отличие от материалов, получаемых в традиционных печах, имеют уникальную композиционную структуру и от-

личаются чистотой по вредным примесям. Использование метода СВС для переработки дисперсных ферросплавов открывает возможности для получения новых композиционных легирующих и огнеупорных материалов [3].

Выплавка стали невозможна без использования ферросплавов, раскисляющих и легирующих материалов. Ежегодный выпуск ферросплавов в России составляет более 1,6 млн. т [4]. Образующиеся при их производстве дисперсные некондиционные ферросплавы в виде циклонных и аспирационных пылей и разных порошкообразных материалов зачастую не находят потребителей и трудно поддаются утилизации. В то же время ежегодный объем образования таких материалов исчисляется десятками тысяч тонн. Так, при производстве крупнотоннажных ферросплавов на каждую 1 т товарного сплава образуется до 50—80 кг субмикронной аспирационной пыли, известной как продукт улавливания от дробления и фракционирования (ПУД). Ежегодно на отечественных предприятиях образуется до 50 тыс. т ПУД разных ферросплавов, а также до 400 тыс. т других порошкообразных фракций в виде отсевов, счисток, просыпей и пр. Утилизируют мел-

кофракционные ферросплавы обычно путем окомкования и переплава. В то же время отсева малотоннажных ферросплавов, в частности феррованадия, зачастую используют непосредственно для легирования стали в виде порошковой проволоки.

Также известны технологии утилизации мелкодисперсных ферросплавов путем их азотирования вакуумно-термическим способом. В СССР вакуумно-термическая технология использовалась довольно продолжительное время для получения азотированных металлов и ферросплавов: FeCr-N, FeV-N, Mn-N и др. В частности нитрид феррованадия получали в вакуумных печах сопротивления ОКБ-616 путем азотирования порошкообразных фракций силикотермического феррованадия (40—50% V) [5]. Способ позволял получать за один цикл до 9 т азотированного продукта с максимальным содержанием азота 11%. При этом содержание азота в одной садке продукта не было однородным и могло изменяться более чем вдвое по причине температурного градиента в различных зонах печи. К другим недостаткам указанного способа относятся: большая длительность процесса (66 ч), довольно высокий удельный расход электроэнергии (1100—1200 кВт·ч/т продукта), невысокая прочность спеков и, как следствие, значительное количество мелкой фракции при измельчении, упаковке и транспортировке. Все это по совокупности затрудняло выплавку азотсодержащих сталей с узкорегламентированным содержанием азота и по причине повышенного расхода легирующего материала увеличивало себестоимость выплавляемого металла.

За рубежом печная вакуумно-термическая технология используется в настоящее время для получения карбонитрид-ванадиевых сплавов, известных по торговой марке Nitrovan [6]. Технология производства таких лигатур заключается в углетермическом восстановлении оксидов ванадия в вакуумной печи сопротивления с последующим насыщением полупродукта газообразным азотом. В результате азотирования получают карбонитридный сплав (VCN), который в зависимости от состава исходной шихты и условий синтеза может содержать от 10 до 19% азота и до 10% углерода (табл. 1). Продукт отличается высокой гигроскопичностью, поэтому поставляется в герметичных пакетах массой по 10 кг ванадия. Сложности примене-

Таблица 1

Химический состав, %, сплава Nitrovan
(в числителе — спецификация;
в знаменателе — типичный состав)

| R | Nitrovan 12 | Nitrovan 16 |
|----|-------------|-------------|
| V | 76—81/78 | 76—81/78 |
| N | 10—14/12 | 14—19/16 |
| C | До 10/7 | До 6/3,5 |
| S | —/0,15 | —/0,15 |
| P | —/0,025 | —/0,025 |
| Al | —/0,15 | —/0,15 |
| Fe | —/0,4 | —/0,4 |
| O | До 1,5/0,75 | До 1,5/1,25 |

ния сплавов Nitrovan на практике также связаны с высокой температурой их плавления (≥ 2400 °C) и низкой плотностью брикетов (2,5—3,0 г/см³). В процессе выплавки стали это снижает усвоение ванадия и азота и приводит к нестабильному их поглощению расплавом от плавки к плавке.

Перспективным способом переработки мелкофракционных ферросплавов является метод СВС, который был предложен для получения тугоплавких неорганических соединений путем сжигания смеси металлов или неметаллов в инертной или реагирующей среде [7]. Процесс СВС — разновидность горения с целью получения не теплоты, выделяемой в ходе синтеза, а конечного продукта. К технологически привлекательным сторонам метода СВС относятся скоротечность процесса и, как следствие, высокая производительность, отсутствие отходов и затрат электроэнергии, конструктивная простота установок СВС в отличие от сложного и энергоемкого печного оборудования.

В зависимости от ведущей реакции синтеза и агрегатного состояния реагентов выделяют четыре основных класса систем СВС: фильтрационные, безгазовые, газовыделяющие и металлотермические. Для утилизации дисперсных некондиционных ферросплавов перспективным представляется применение фильтрационной и безгазовой технологий синтеза. Первая может быть применена для получения азотсодержащих ферросплавов и лигатур, востребованных при производстве сталей, легированных азотом. Безгазовый тип СВС может использоваться для получения комплексных лигатур и композиционных материалов на основе боридов, карбидов и других тугоплавких соединений для сталей-

плавильного производства и огнеупорной промышленности.

Прежний опыт использования некоторых ферросплавов и лигатур в качестве шихтовых материалов в фильтрационных и безгазовых процессах СВС показывает принципиальную возможность их осуществления. В отличие от реакций прямого синтеза СВС с участием ферросплавов становится возможным в результате обменных экзотермических реакций [8—10]. Впервые способ получения азотированных ферросплавов синтезом горением был разработан М.Х. Зиятдиновым с коллегами [11]. По предложенному способу один или несколько исходных компонентов (сплавов) измельчали в порошок и помещали в азотсодержащую среду с избыточным давлением, затем инициировали горение шихты путем ее локального нагрева и поддерживали избыточное давление азота до окончания реакции. В результате реакции азотирования получали такие азотсодержащие сплавы, как Nb-Ta-Fe-N, Ti-Co-N, V-Mo-Fe-N и др., обладающие следующими характеристиками: прочность на раздавливание 50—3000 МПа, плотность 5—8 г/см³, пористость от 1 до 30%, содержание азота 5—17%. Синтезируемые продукты имели доволь-

но высокую неравномерность содержания азота в объеме каждого спека, которая могла достигать 10%, что усложняло выплавку азотсодержащих сталей и сплавов с узкими концентрационными пределами по азоту.

Цель настоящей работы — исследование возможности переработки отсеков феррованадия методом СВС и применения синтезированного нитрида феррованадия для выплавки азотсодержащих сталей. В соответствии с поставленной целью решались следующие задачи: исследование химического и фазового составов отсеков феррованадия; изучение возможности применения метода СВС для утилизации порошкообразных фракций феррованадия; экспериментальные исследования в лабораторных СВС-реакторах закономерностей фильтрационного горения в азоте отсеков феррованадия; промышленное опробование применения синтезированного нитрида феррованадия для микролегирования азотсодержащей рельсовой стали.

Материалы и методика эксперимента. В настоящей работе продемонстрирована возможность получения композиционного нитрида феррованадия при переработке промышленных отсеков феррованадия марок FeV50 и FeV80. Состав исходных материа-

Таблица 2

Химический, фазовый и гранулометрический составы отсеков феррованадия марок FeV50 и FeV80

| Показатель | FeV50 | FeV80 |
|-------------------------------|--|--|
| Химический состав, % | V 49,5; Si 2,5; C 0,4; O 1,5; Ca 0,3; S 0,03; P 0,04 | V 80,5; Si 0,9; C 0,16; O 1,5; Ca 0,2; S 0,012; P 0,03 |
| Фазовый состав по данным РФА* | σ -VFe | (V,Fe) |
| Гранулометрический состав, мм | 0—2 | 0—2 |

*Рентгенофазовый анализ.



Фиг. 1. Лабораторные СВС-реакторы: а — объемом 3 дм³ (БПД-3); б — 15 дм³ (БПД-15)

лов, использованных в экспериментах, представлен в табл. 2. Из приведенных данных следует, что химический состав материалов полностью соответствует составу стандартного феррованадия по ГОСТ 27130—94. Эксперименты проводили в лабораторных СВС-реакторах БПД («Бомба постоянного давления») объемом 3 и 15 дм³ (фиг. 1). Для проведения опытов в БПД-3 использовали цилиндрические образцы диаметром 30—40 мм и высотой $h = 60—80$ мм, а в БПД-15 — образцы диаметром 60—80 мм и $h = 120—160$ мм. Образцы были как формованные, так и неформованные: в первом случае их получали прессованием на двухосном прессе, а во втором — шихтовая смесь засыпалась в газопроницаемый цилиндрический стакан из стальной сетки. Пористость Π , %, исходных образцов вычисляли по относительной плотности:

$$\Pi = (1 - \rho_n/\rho_{и})100, \quad (1)$$

где ρ_n , $\rho_{и}$ — соответственно насыпная и истинная плотность материала, г/см³.

Для измерения скорости горения применены средства фотовидео съемки процесса через штатные окна реакторов. Температуру горения t_r измеряли с помощью микротермопар ВР-5/ВР-20. Спай термопары помещался в нижний торец образца на глубину 15—20 мм. В качестве реагирующего газа использовали газообразный азот чистотой 99,95%.

Отсевы феррованадия использовали в опытах как в исходном состоянии, так и после доизмельчения и классификации. Помол осуществляли в лабораторной вибромельнице с

твердосплавной гарнитурой «Эталон 0,5 × 6», а порошки требуемой дисперсности выделяли на ситовом виброрассеивателе «Литмаш-прибор». Гранулометрический состав материалов контролировали с использованием анализатора частиц Fritsch Analysette 22, а для контроля влажности служил анализатор влажности ОНАУС МВ-35.

Для инициирования процесса горения использовали запальную смесь, изготовленную из порошков титана (ТПП-8) и кремния (КРО) в массовом соотношении 75:25. Зажигание смеси осуществляли при помощи нихромовой спирали. Продукты синтеза анализировали с использованием следующего аналитического оборудования: для проведения химического анализа — ретгенофлуоресцентный анализатор ARL Advant'x, газоанализатор LECO TCH 600 и анализатор серы и углерода LECO CS230; для рентгенофазового анализа синтезированных материалов — дифрактометр Shimadzu XRD 6000 и микронзондовый анализатор Camebax-Microbeam.

Результаты исследования и их обсуждение. При фильтрационном горении сплавов на их реакционную способность большее влияние оказывает размер частиц. В исходном состоянии (крупность частиц 0—2 мм) горение в азоте отсевов FeV осуществить не удалось, в связи с чем провели их доизмельчение и рассев с получением на выходе трех фракций каждой марки: 0—0,05; 0,05—0,16 и 0,16—0,4 мм. Проведенные эксперименты показали возможность азотирования в условиях естественной фильтрации порошков феррованадия крупностью 0—0,05 и 0,05—0,16 мм (табл. 3). Горение более крупных

Таблица 3

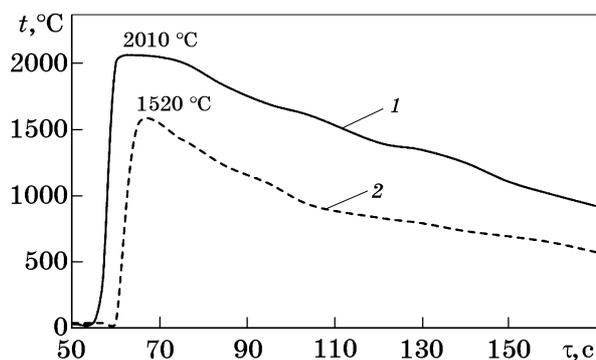
Физико-химические параметры*
азотирования фракционированных порошков
феррованадия марок FeV80 и FeV50 (давление азота 3 МПа)

| Показатель | Фракция порошка, мм | | | | | |
|-------------------------|---------------------|-------|-----------|-------|-------------|-------|
| | 0—0,05 | | 0,05—0,16 | | 0,16—0,4 | |
| | FeV80 | FeV50 | FeV80 | FeV50 | FeV80 | FeV50 |
| t_r , °C | 2013 | 1521 | 2091 | 1588 | Горения нет | |
| v_r , мм/с | 3,3 | 4,3 | 0,9 | 1,4 | » | » |
| N, % | 10,6 | 9,2 | 13,2 | 10,2 | » | » |
| Степень азотирования, % | 60 | 84 | 75 | 93 | » | » |

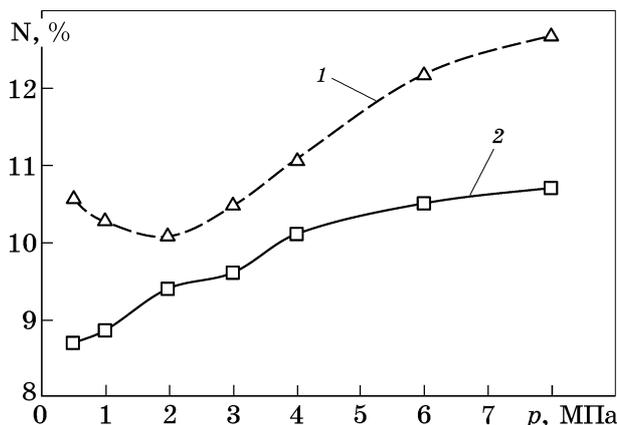
* t_r — температура горения; v_r — скорость горения; N — содержание азота; степень азотирования (V→VN).

порошков исходных сплавов (фракция 0,16—0,4 мм) реализовать не удалось даже при максимальном давлении реагирующего газа в реакторе (8 МПа). Как видно из данных табл. 3, с увеличением размера частиц скорость горения сплавов уменьшается, но при этом содержание азота в продуктах возрастает. Связано это с тем, что при более низкой скорости горения крупных порошков увеличивается время пребывания реагирующего компонента в высокотемпературной зоне горения, что повышает степень насыщения его азотом. Кроме того, более низкая скорость тепловыделения при горении крупного порошка уменьшает оплавление продукта. Более низкая степень азотирования высокопроцентного феррованадия FeV80 в сравнении с FeV50 связана с различием их кристаллического строения [12]. В результате проведенного послойного РФА образцов с принудительно остановленным фронтом горения (путем резкого сброса давления в реакторе) было обнаружено, что реакции горения порошка FeV50+N₂ предшествует фазовый переход $\gamma \rightarrow \alpha$. Перестройка кристаллической решетки интенсифицирует диффузионные процессы, что способствует максимальному поглощению азота реагирующим сплавом в зоне горения. В процессе азотирования феррованадия FeV80 часть исходного материала «догорает» уже после прохождения волны горения, о чем свидетельствуют температурные профили азотирования материалов (фиг. 2). Из-за интенсивного плавления и коагуляции частиц исходного порошка в волне горения часть сплава остается непрореагировавшей.

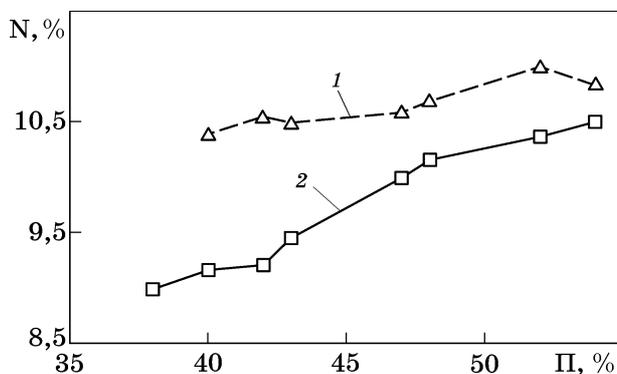
В экспериментах установлено, что порошки феррованадия фракции 0—160 мкм азотируются в широком интервале давлений реагирующего газа (фиг. 3). С увеличением давления азота в реакторе скорость горения и содержание азота в продуктах возрастают, что характерно для фильтрационных процессов СВС [13, 14]. При увеличении давления азота в реакторе с 0,5 до 8,0 МПа скорость горения образцов FeV80 и FeV50 увеличивается соответственно с 0,9 до 4,9 и с 0,8 до 6,1 мм/с, а содержание азота достигает соответственно 12,7 и 10,7%. Эксперименты с образцами разной пористости показали, что содержание азота в продуктах горения снижается при уменьшении пористости исходных образцов (фиг. 4). Главным образом это



Фиг. 2. Термограммы азотирования порошков FeV80 (1) и FeV50 (2) фракции 0—50 мкм (реактор БПД-15, $p_{N_2} = 6$ МПа; диаметр образцов $d = 60$ мм)



Фиг. 3. Содержание азота в нитриде феррованадия FeV80 (1) и FeV50 (2) в зависимости от давления в реакторе. Фракция исходных порошков 0—160 мкм



Фиг. 4. Содержания азота в нитриде феррованадия FeV80 (1) и FeV50 (2) в зависимости от пористости исходных образцов ($p_{N_2} = 6$ МПа; $d = 70$ мм)

связано с ухудшением фильтрации реагирующего газа к фронту горения. По этой причине азотирование высокоплотных образцов ($\Pi < 40\%$) в режиме горения реализовать не удается. Таким образом, с целью достижения максимального содержания азота в продукте необходимо использовать неформованные образцы с пористостью исходной ших-



Фиг. 5. Макроструктура и фазовый состав СВС-нитрида феррованадия и сплава типа Nitrovan

Таблица 4

Химический состав, %, нитрида феррованадия
FERVANIT® ТУ 24.10.12-054-21600649—2021

| Марка | N | V | C | Si | S | P | Al | Mn |
|---------|-------|-------|----------|-----|------|------|-----|-----|
| | | | не более | | | | | |
| ФВ65Н13 | 11—14 | 60—70 | 0,75 | 5,0 | 0,04 | 0,05 | 1,5 | 4,0 |
| ФВ45Н9 | 8—11 | 40—50 | 0,75 | 6,0 | 0,04 | 0,05 | 1,5 | 4,5 |

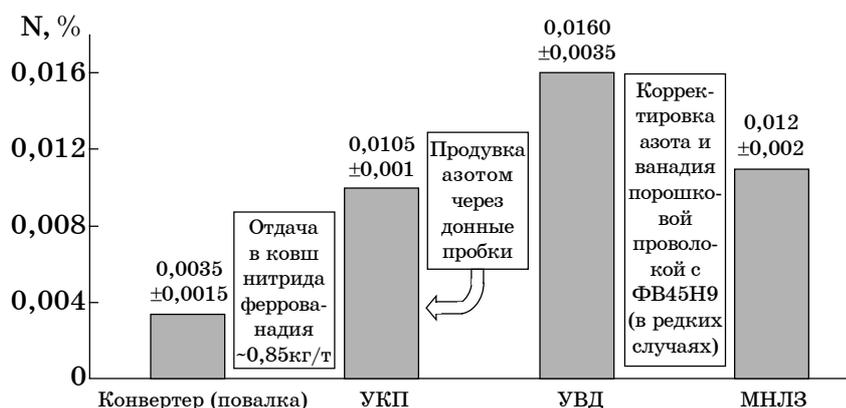
ты более 50%. Выявленные зависимости (см. фиг. 3, 4) хорошо согласуются с экспериментальными данными, полученными в работе [15] при исследовании закономерностей горения в азоте порошков модельных и товарных FeV-сплавов, что, вероятно, связано с близким химическим составом исходных материалов одинаковых марок (FeV50 и FeV80).

Нитрид феррованадия, полученный из FeV50, представляет собой высокоплотный ($\rho \approx 6,4 \text{ г/см}^3$) практически беспористый сплав ($\Pi \approx 2\%$) с литой структурой (фиг. 5). Такой продукт является двухфазным и содержит моонитрид ванадия ($\delta\text{-VN}$) и альфа-железо ($\alpha\text{-Fe}$). Азотированный сплав, полученный из феррованадия FeV80, имеет спеченную структуру, основными фазами которой являются полунитрид и нитрид ванадия и альфа-железо. Коагуляция частиц исходного FeV80 в волне горения препятствует полному доазотированию сплава после прохождения фронта, в результате чего степень его азотирования (~75%) значительно ниже степени азотирования феррованадия FeV50 (>90%). Плотность нитрида феррованадия FeV80 составляет ~4,9 г/см³ при пористости ~40%. В табл. 4 представлен химический состав синтезированных сплавов в соответствии с разработанными ТУ 24.10.12-054-21600649—

2021. Синтезированный нитрид феррованадия испытывали на предприятии АО «ЕВРАЗ-НТМК» при выплавке рельсовой стали К76ХФ, используемой для изготовления рельсов низкотемпературной надежности и рельсов для скоростного совмещенного и высокоскоростного пассажирского движения



Фиг. 6. Технологическая схема выплавки рельсовой стали К76ХФ дуплекс-процессом в конвертерном цехе АО «ЕВРАЗ-НТМК»



Фиг. 7. Среднее содержание азота в пробах рельсового металла К76ХФ, выплавленного с использованием нитрида феррованадия ФВ45Н9 (УКП — установка ковш-печь; УВД — установка вакуумной дегазации; МНЛЗ — машина непрерывного литья заготовок)

[16]. Для микролегирования металла азотом и ванадием использовался легирующий материал марки ФВ45Н9 (43—44% V и 9—9,5% N), изготовленный в промышленных СВС-реакторах объемом 0,15 м³. Выплавка металла осуществлялась в конвертерах емкостью 160 т дуплекс-процессом (фиг. 6). Содержание азота в металлическом полупродукте на выпуске из конвертера в большинстве случаев составляло 0,003—0,004%. Довольно низкий предел содержания азота объясняется отсутствием «передувов» металла и ведением плавки исключительно на углеродистом полупродукте. Присадка кускового нитрида феррованадия осуществлялась во время выпуска плавки в ковш при расходе лигатуры на плавку 120—130 кг. В процессе ковшовой доводки металла усреднительные продувки расплава через донные пробки сталеразливочного ковша осуществляли азотом вместо аргона. По окончании ковшовой обработки металла (перед вакуумированием) общее содержание азота в металле составляло 0,016±0,0035 % (фиг. 7). После вакуумной обработки металла в течение не менее 20 мин при остаточном давлении в вакуум-камере не более 1,33 кПа (10 мм рт. ст.) степень деазотации металла составляла 25—38%, что обеспечивало содержание азота в стальном продукте на уровне 0,012±0,002%. Во время разлива увеличения содержания азота в металле не наблюдалось, во всех опытных плавках было обеспечено марочное содержание азота и ванадия (0,010—0,014% N, 0,04—0,05% V).

Выводы. 1. Определено, что для получения композиционного нитрида феррованадия

возможно использование отсевов стандартного феррованадия марок FeV50 и FeV80 при условии домола порошков из исходного состояния до фракции 0—0,16 мм.

2. Синтезированный нитрид феррованадия FERVANIT имеет высокие плотность (4,9—6,5 г/см³) и прочность (≥100 МПа), низкую пористость (~2% у плавленного сплава ФВ45Н9) и значительно превосходит по техническим характеристикам известные зарубежные сплавы типа Nitrovan. В результате проведенных промышленных испытаний композиционного нитрида феррованадия марки ФВ45Н9 при проведении 158 плавок рельсовой стали К76ХФ в конвертерном цехе АО «ЕВРАЗ-НТМК» достигнуто высокое усвоение ванадия и азота (не менее 91 и 84% соответственно) при введении на выпуске плавки кусковой лигатуры в ковш со средним удельным расходом ~0,85 кг/т.

3. По результатам испытаний легирующий материал FERVANIT одобрен для серийного использования при выплавке рельсовой стали, а также других азотсодержащих сталей транспортного и конструкционного назначения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pavlov, S.V. Wastes and emissions in production of ferrosilicon / S.V. Pavlov, Yu.P. Snitko, S.B. Plyukhin // *Elektrometallurgiya*. 2001. №4. P.22—28.
2. Теслев, С.А. Способ переработки мелких фракций ферросилиция / С.А. Теслев, Е.П. Теслева // *Инновационные технологии и экономика в машиностроении* : сб. трудов V Междунар. науч.-практ. конф. : в 2 т. (Юргинский технологический институт). — Томск : Изд-во Томского политехнич. ун-та. Т.1. 2014. С.407—409.

3. Манашев, И.Р. Утилизация дисперсных отходов ферросплавного производства на базе металлургического СВС-процесса / И.Р. Манашев, Т.О. Гаврилова, И.М. Шатохин, М.Х. Зиятдинов, Л.И. Леонтьев // Изв. вузов. Чер. металлургия. 2020. №63(8). С.591—599.
4. Павлов, А.В. Текущее состояние производства ферросплавов в России и странах СНГ / А.В. Павлов, Д.Я. Островский, В.В. Аксенова, С.А. Бишенов // Изв. вузов. Чер. металлургия. 2020. №63(8). С.600—605.
5. Зайко, В.П. Технология ванадийсодержащих ферросплавов / В.П. Зайко, В.И. Жучков, Л.И. Леонтьев [и др.]. — М. : ИКЦ «Академкнига». 2004. 515 с.
6. Фофанов, А.А. Перспективы применения сплавов Нитрован для микролегирования стали ванадием и азотом / А.А. Фофанов, Л.А. Смирнов, А.Ю. Кузнецов, О.В. Заякин // Новые технологии и материалы в металлургии : сб. науч. тр. — Екатеринбург : МИЦ, 2021. С.150—167.
7. Мержанов, А.Г. Твердопламенное горение / А.Г. Мержанов., А.С. Мукасян. — М. : ТОРУС ПРЕСС, 2007. 336 с.
8. Зиятдинов, М.Х. Опыт разработки, производства и применения СВС-материалов для металлургии / М.Х. Зиятдинов, И.М. Шатохин // Металлург. 2008. №12. С.50—55.
9. Манашев, И.Р. Технология производства азотированных ферросплавов методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза / И.Р. Манашев, Т.О. Гаврилова, И.М. Шатохин, М.Х. Зиятдинов // Теория и технология металлургического производства. 2019. №4(31). С.4—11.
10. Shaymardanov, K.R. Self-propagating high-temperature synthesis of Ferro silico titanium / K.R. Shaymardanov, I.M. Shatokhin, I.R. Manashev // Proceed. INFACON XIII (13th Intern. Ferroalloys Congress : Efficient Technologies in Ferroalloy Industry). — [S.l. : s.n.]. 2013. P.781—786.
11. Pat. 2080785 GB. Int. cl. C22C 1/04, B22F 3/12. Production of metallic composition / M.Kh. Ziatdinov, J.M. Maksimov, A.D. Kolmakov [et al.]. — Publ. 24.04.1985.
12. Зиятдинов, М.Х. Производство СВС-нитрида феррованадия для выплавки высокопрочных низколегированных сталей / М.Х. Зиятдинов, И.М. Шатохин // Сталь. 2009. №11. С.39—46.
13. Питюлин, А.Н. О закономерностях и механизме послыонного фильтрационного горения металлов / А.Н. Питюлин, В.А. Щербаков, И.П. Боровинская, А.Г. Мержанов // Физика горения и взрыва. 1979. Т.15. №4. С.9—17.
14. Боровинская, И.П. Горение гафния в азоте / И.П. Боровинская, А.Н. Питюлин // Физика горения и взрыва. 1978. Т.14. №1. С.137—140.
15. Зиятдинов, М.Х. Развитие теоретических и технологических основ самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) при разработке промышленной технологии производства материалов для сталеплавильного и доменного производств : дис. ... д-ра техн. наук : 05.16.02 / Зиятдинов Мансур Хузиахметович ; Магнитогорский гос. техн. ун-т им. Г.И. Носова. — Томск, 2016. 270 с.
16. Зажигаев, П.А. Современная технология и показатели переработки ванадийсодержащих чугунов кислородно-конвертерным дуплекс-процессом на АО «ЕВРАЗ-НТМК» / П.А. Зажигаев, Л.А. Смирнов, Е.В. Шеховцов, А.Д. Белокуров, С.А. Спирин // Новые технологии и материалы в металлургии : сб. науч. тр. — Екатеринбург : МИЦ, 2021. С.73—86.