



УДК 669.046.558

DOI 10.17073/0368-0797-2026-2-128-135



Оригинальная статья

Original article

ОПТИМИЗАЦИЯ УСЛОВИЙ ПРИСАДКИ МАРГАНЕЦ- И КРЕМНИЙСОДЕРЖАЩИХ ФЕРРОСПЛАВОВ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ СТАЛИ

А. И. Дагман¹, В. С. Ильичев¹, Е. Н. Тюленев¹, О. В. Заякин²,
В. И. Жучков², И. Н. Кель², Д. С. Ренев²

¹ ПАО «Новолипецкий металлургический комбинат» (Россия, 398040, Липецк, пл. Металлургов, 2)

² Институт металлургии имени академика Н.А. Ватолина Уральского отделения РАН (Россия, 620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, 101)

sense199@mail.ru

Аннотация. Авторы исследовали процессы плавления ферросплавов марок ФМн78, ФМн88, МнС17, ФС65, ФС75, СК15 и АВ87 в железоуглеродистом расплаве при производстве стали марок 08Ю, 3сп, Э3А и S355MC. Исследование проведено с использованием математической модели, разработанной учеными ИМЕТ УрО РАН и УрФУ, учитывающей коэффициенты тепло- и массоотдачи, а также физико-химические и теплофизические характеристики ферросплавов и стали. Показано, что крупность кусков ферросплавов при различных температурах железоуглеродистого расплава оказывает большое влияние на изменение времени их плавления (растворения). При увеличении размера куска возрастает масса ферросплава, что приводит к увеличению толщины намерзаемой стальной корки. С увеличением диаметра куска общее время плавления ферросплава увеличивается. Все изучаемые ферросплавы относятся к группе легкоплавких сплавов. Наибольшим временем плавления из рассмотренных ферросплавов характеризуется ферромарганец марки ФМн78, общее время плавления его куска диаметром 100 мм в стали 08Ю может превышать 160 с при температуре ванны 1650 °С. Снижение размера куска ферросплава до 60 мм приводит к двукратному сокращению времени его плавления. На основании проведенных исследований разработаны рациональные условия, технологические особенности присадки марганец- и кремнийсодержащих ферросплавов при производстве стали марок 08Ю, 3сп, Э3А и S355MC. Результаты исследования имеют важное значение для совершенствования технологий выплавки стали, так как позволяют оптимизировать продолжительность периодов плавки, выдержки, схему присадки ферросплавов и степень раскисления металла.

Ключевые слова: металлургия, ферросплавы, математическое моделирование, время плавления, механизм плавления, сталь, ферросилиций, ферромарганец

Для цитирования: Дагман А.И., Ильичев В.С., Тюленев Е.Н., Заякин О.В., Жучков В.И., Кель И.Н., Ренев Д.С. Оптимизация условий присадки марганец- и кремнийсодержащих ферросплавов при производстве стали. *Известия вузов. Черная металлургия.* 2026;69(2): 128–135. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2026-2-128-135>

* По материалам XVIII Международного Конгресса сталеплавильщиков (г. Санкт-Петербург).

OPTIMIZATION OF ADDITION CONDITIONS FOR MANGANESE- AND SILICON-CONTAINING FERROALLOYS IN STEEL PRODUCTION

A. I. Dagman¹, V. S. Il'ichev¹, E. N. Tyulenev¹, O. V. Zayakin²,
V. I. Zhuchkov², I. N. Kel' ², D. S. Renev²

¹ PJSC “Novolipetsk Metallurgical Plant” (2 Metallurgov Sqr., Lipetsk 398040, Russian Federation)

² Vatin Institute of Metallurgy of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (101 Amundsena Str., Yekaterinburg 620016, Russian Federation)

sense199@mail.ru

Abstract. The article presents the results of a study on the melting processes of ferroalloy grades FeMn78, FeMn88, MnS17, FeSi65, FeSi75, SiCa15, and AB87 in an iron-carbon melt during the production of steel grades 08U, 3Sp, E3A, and S355MC. The research was conducted using a mathematical model developed by scientists from the Institute of Metallurgy, UB RAS and the Ural Federal University, which accounts for heat and mass transfer

coefficients, as well as the physicochemical and thermophysical characteristics of the ferroalloys and steel. It is shown that the lump size of the ferroalloys at different temperatures of the iron-carbon melt significantly affects the change in their melting (dissolution) time. An increase in the lump size leads to an increase in the mass of the ferroalloy, which results in a thicker frozen steel shell and higher heat content. With an increase in the lump diameter, the total melting time of the ferroalloy increases. All studied ferroalloys belong to the group of low-melting alloys. Among the considered ferroalloys, high-carbon ferromanganese grade FeMn78 has the longest melting time; the total melting time of its 100 mm diameter lump in 08U steel can exceed 160 s at a bath temperature of 1650 °C. Reducing the ferroalloy lump size to 60 mm leads to a twofold reduction in its melting time. Based on the conducted research, rational conditions and technological features for the addition of manganese- and silicon-containing ferroalloys in the production of 08U, 3SP, E3A, and S355MC steels were developed. The research results are of great importance for improving steel smelting technologies, as they allow for optimizing the duration of melting and holding periods, the ferroalloy addition scheme, and the degree of metal deoxidation.

Keywords: metallurgy, ferroalloys, mathematical modeling, melting time, melting mechanism, steel, ferrosilicon, ferromanganese

For citation: Dagman A.I., Il'ichev V.S., Tyulenev E.N., Zayakin O.V., Zhuchkov V.I., Kel' I.N., Renev D.S. Optimization of addition conditions for manganese- and silicon-containing ferroalloys in steel production. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2026;69(2):128–135. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2026-2-128-135>

* Based on the Materials of the 18th International Congress of Steelmakers (Saint Petersburg).

ВВЕДЕНИЕ

Ключевыми параметрами, определяющими эффективность раскисления и легирования стали, а также время ее обработки, являются механизм и скорость плавления ферросплавов в жидкой стали. Изучению процесса плавления легирующих добавок различных систем в железоуглеродистом расплаве посвящено большое количество как отечественных [1–6], так и зарубежных [7–11] исследований.

Согласно данным работ [1; 3] существует несколько экспериментальных подходов определения времени плавления, основанных на непрерывном или периодическом взвешивании ферросплава во время контакта его с обрабатываемым металлом. Например, метод вращающегося в расплаве диска с равнодоступной поверхностью. Главный недостаток этого метода: он пригоден только для материалов диска, имеющих температуру плавления больше, чем расплава.

Альтернативным является метод растворения неподвижных стержней в жидком железе с периодическим взвешиванием образцов. Для определения времени плавления этим способом также используют калориметрические измерения продолжительности температурного скачка в тигле. Однако использование данного метода сопряжено с нарушением гидродинамики жидкого расплава и не отражает реальную форму и характер движения ферросплавных частиц в ковше.

Распространенным способом определения времени плавления сплавов в стали является отбор ее проб после ввода в расплав ферросплава с последующим анализом образцов.

Существующие экспериментальные методы определения времени плавления и растворения ферросплавов сложны и недостаточно учитывают реальные условия растворения сплавов, обладают, как правило, невысокой точностью и воспроизводимостью. Кроме этого, отслеживание образования и растворения стальной корки в условиях, близких к промышленным, затруднительно. Именно поэтому достаточно актуальными

являются математические подходы к изучению времени плавления материалов. Такие методы обладают по сравнению с экспериментальными меньшей сложностью и затратами, большей производительностью, а также возможностью изучения широкого спектра систем образцов (состав, размер, температура).

В большинстве работ [2–4; 8; 12] моделирование процесса плавления основано на решении уравнения теплопроводности Фурье. По мнению большинства авторов, процесс плавления включает два взаимосвязанных этапа: формирование стальной корочки и расплавление (растворение) ферросплава.

При контакте холодного ферросплава с жидкой сталью на его поверхности мгновенно образуется твердая металлическая оболочка («корка»). Определение времени ее плавления затруднительно из-за быстротечности процесса, особенно при малом размере добавки. Традиционные модели предполагают равномерный рост стальной корки и плавление с постоянным коэффициентом теплопередачи [13].

Однако в ходе более глубоких исследований образования оболочки и расплавления вокруг ферросплава, проведенных в работе [14], было установлено асимметричное изменение толщины намерзаемой оболочки вокруг частицы. При использовании постоянного коэффициента теплопередачи на границе раздела твердое тело/жидкость вокруг частицы образуется оболочка, имеющая симметричную толщину, которая равномерно увеличивается, а затем расплавляется. В данном исследовании установлено, что плавление оболочки начинается с верхней части, способствуя более высокой скорости роста намерзания в нижней, исходя из этого авторы делают вывод о влиянии коэффициента теплопередачи на процесс плавления ферросплава. Кроме того, изучение конвекции показало, что она может развиваться внутри частично расплавленных легкоплавких добавок внутри оболочки, влияя на процесс плавления этой оболочки. Благодаря точному учету внутренней конвекции наблюдалось сокращение времени плавления оболочки на 20 % в верхней части. Это указывает

на необходимость использования сложных нестационарных моделей теплопереноса.

После проплавления корки начинается этап непосредственного плавления (растворения) ферросплава. Исследования [3; 14] показывают, что лимитирующая стадия процесса (теплоперенос или массоперенос) зависит от соотношения температур плавления ферросплава и ванны.

В работе [15] проведено сравнение механизма плавления ферромарганца в чугунах и стали в зависимости от температуры ванны жидкого металла. При температуре ванны ниже, чем температура плавления ферросплава, процесс контролируется массопереносом. Если температура ванны выше, то процесс плавления определяется теплопередачей.

Это подтверждается и для других систем, примером являются исследования скорости массопереноса ниобиевых ферросплавов в динамических условиях [16]. Экспериментально установлено, что массоперенос, происходящий в течение периода свободного растворения (после проплавления стальной корки), является экзотермическим, а лимитирующей стадией выступает диффузия жидкой фазы через слой границы раздела масс. На основе полученных данных авторами сделан прогноз полного растворения ниобия в условиях принудительной и естественной конвекции, показывающий, что при близкой температуре конвекция позволяет снизить время плавления примерно на 30 %.

Анализ влияния геометрических параметров легирующего материала был проведен в работе [8]. Для описания скорости плавления частиц ферромарганца, добавляемых в ковш, вводится функция распределения плавления, которая включает в себя время плавления отдельных частиц, их размер, скорость перемещения по жидкому расплаву, температуру и время. Анализ результатов показал, что главными факторами, влияющими на время плавления ферросплавов, являются размеры частиц, температура ванны и скорости перемещения в объеме расплава.

Эти выводы подтверждают результаты исследований работы [17]. Отмечено, что увеличение размера частицы алюминия приводит к росту времени плавления за счет роста массы, при этом доля времени, расходуемая на плавление намерзаемой корки, снижается. Для интенсификации времени плавления необходимо перемешивание расплава, например газом, что сокращает время процесса до 50 %.

В работах [18; 19] изучена кинетика растворения ферросилиция в жидкой стали. Для этого в расплав металла погружали твердый образец ферросилиция цилиндрической формы. В ходе экспериментов авторами установлено, что экзотермическое растворение эвтектики Fe_2Si на внутренней границе стальной оболочки вызывает эрозию последней, вследствие чего время растворения оболочки сокращается. На основе полученных данных тепло- и массопереноса авто-

рами предложена математическая модель растворения ферросплавов, отличительной особенностью которой является учет влияния эвтектики Fe_2Si на процесс плавления.

В работах [11; 20] предложено модельное уравнение времени плавления, основанное на определении степени отклонения химического эквивалента состава и структурного параметра для конкретных составов расплавов от вычисляемых для идеальных смесей исходных компонентов. Главным недостатком данного способа является отсутствие учета гидродинамики и свойств обрабатываемого расплава, что значительно снижает точность моделирования.

Несмотря на достаточно большой ряд моделей для определения времени плавления ферросплавов в отечественной и зарубежной литературе практически отсутствуют сведения о применимости их к промышленным данным. В связи с этим в работе проведено моделирование времени плавления сплавов-раскислителей, применяемых в реальных условиях производства ПАО «Новолипецкий металлургический комбинат» (ПАО «НЛМК»).

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для изучения процессов плавления ферросплавов была использована математическая модель, разработанная учеными Института металлургии имени академика Н.А. Ватолына Уральского отделения РАН (ИМЕТ УрО РАН) и Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (УрФУ) [3], реализованная в виде программного комплекса. Эта модель основана на решении интегральным методом системы дифференциальных уравнений, учитывающих коэффициенты тепло-массопереноса. Тепловая часть модели базируется на классификации ферросплавов (в зависимости от соотношения температур ванны (T_v), начала кристаллизации ферросплавов (T_k) и железоуглеродистого расплава (T_c)) на легкоплавкие ($T_k \leq T_c$), тугоплавкие ($T_c < T_k < T_v$) и сверхтугоплавкие ($T_k \geq T_v$). Модель включает в себя решение дифференциального уравнения теплопроводности Фурье для каждой из фаз (корки, твердого ядра, жидкого слоя ферросплава), количество которых зависит от периода плавления, типа ферросплава и граничных условий, определяемых конвективным теплообменом и процессом плавления. Окончанием процесса плавления является полное расплавление ферросплава.

Модель использовали ранее для изучения времени плавления сплавов различных систем с подтверждением достоверности полученных результатов.

В настоящей работе изучено влияние на время плавления ферросплавов не только их состава, крупности, но и марки обрабатываемой стали (ее теплофизических характеристик). Полученные в ходе математического моделирования данные времени плавления ферроспла-

Теплофизические и физико-химические свойства ферросплавов

Thermophysical and physico-chemical properties of ferroalloys

Ферросплав	Температура плавления, °С	Плотность, кг/м ³	Теплоемкость, Дж/(кг·К)		Теплопроводность, Вт/м·К	
			в жидком состоянии	в твердом состоянии	в жидком состоянии	в твердом состоянии
ФМн78	1280	7300	825	500	46	47
ФМн88	1275	7200	835	480	22	23
МнС17	1260	6210	813	523	48	47
ФС65	1338	3260	763	631	112	125
ФС75	1312	3000	749	655	122	131
АВ87	660	3092	1126	858	103	95
СК15	1250	3470	774	603	102	129

вов были использованы при разработке технологических особенностей выплавки сталей в условиях ПАО «НЛМК».

В качестве исходных для математического моделирования были приняты следующие параметры: температура ванны постоянна и составляет 1650 °С, что соответствует реальным условиям обработки стали исследуемых марок ферросплавами. Температура кристаллизации стали в зависимости от марки находится в диапазоне 1500 – 1535 °С.

В качестве ферросплавов использованы ферромарганец марок ФМн78 и ФМн88, ферросиликомарганец (МнС17), ферросилиций (ФС65 и ФС75), силикокальций (СК15) и вторичный алюминий (АВ87).

В качестве допущения принято, что куски ферросплавов имеют сферическую форму (диаметр 2 – 100 мм) и начальную температуру 20 °С. Теплофизические и физико-химические свойства ферросплавов, используемые для моделирования, были получены экспериментально и на основе литературных данных (см. таблицу).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты математического моделирования времени плавления рассматриваемых ферросплавов в расплаве стали марок 08Ю, 3сп, Э3А и С355МС представлены в виде графических зависимостей на рис. 1 – 4.

Фракция ферросплавов оказывает большое влияние на изменение времени их плавления (растворения). При увеличении размера куска возрастает масса ферросплава, что приводит к росту толщины намерзаемой стальной корки и, как следствие, к увеличению его теплосодержания. С увеличением диаметра куска общее время плавления ферросплава увеличивается в соответствии с зависимостями, представленными на рис. 1 и 2.

При производстве углеродистых сталей ферросплавы присаживают в первой половине выпуска

металла из конвертера, то есть до 50 % наполнения сталеразливочного ковша. При этом куски ферросилиция ФС65 диаметром 70 мм расплавляются за 40 с, а диаметром 100 мм – за 60 с (рис. 1). Наибольшее время плавления у марганецсодержащих ферросплавов: ферромарганца, ферросиликомарганца. Куски высокоуглеродистого ферромарганца Фмн78 размером не более 70 мм успевают раствориться в течение 100 с, тогда как куски диаметром 100 мм растворяются за 160 с. Время плавления остальных сплавов значительно меньше, например, для ферросилиция во всем фракционном диапазоне время не превышает 60 с. Алюминий, являясь самым легкоплавким материалом, расплавляется за 16 с при диаметре куска 100 мм. На основании полученных данных для обеспечения полного расплавления ферросплавов даже при минимальной регламентированной продолжительности выпуска 240 с был ограничен максимальный размер куска ферросплава до 70 мм.

Технология производства трансформаторной стали Э3А предполагает раскисление и легирование стали

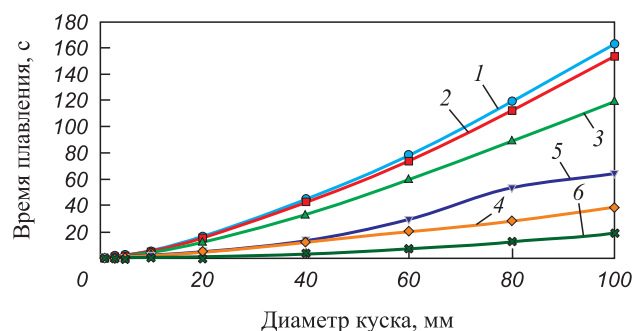


Рис. 1. Зависимость времени плавления используемых ферросплавов от фракционного состава для стали 3сп при температуре ванны 1650 °С:

1 – ФМн78; 2 – ФМн88; 3 – МнС17; 4 – ФС75; 5 – ФС65; 6 – АВ87

Fig. 1. Dependence of melting time of the ferroalloys used on fractional composition for 3sp steel at bath temperature of 1650 °С:

1 – FeMn78; 2 – FeMn88; 3 – MnSi17; 4 – FeSi75; 5 – FeSi65; 6 – AV87

на выпуске металла из конвертера. Из используемых в данном процессе ферросплавов (рис. 3) наибольшим временем плавления характеризуется ферросилико-марганец, при диаметре куска 70 мм его расплавление занимает около 70 с. Время плавления в жидкой стали алюминия во всем фракционном диапазоне менее 20 с.

При освоении этой технологии в конвертерном цехе присадка ферросилиция в количестве примерно 40 кг/т стали иногда приводила к образованию «коржей», которые располагались на границе раздела шлак – металл в сталеразливочном ковше. Это вызывало большие затруднения при дальнейшей обработке на установках доводки металла (УДМ), так как, во-первых, не позволяло погружать фурму для продувки аргоном, во-вторых, вызывало сложности с определением и, соответственно, с корректировкой химического состава стали. Увеличение продолжительности выдержки на 1 мин и равномерности присадки ферросилиция позволило исключить эту проблему.

Для снижения расхода алюминия при производстве стали 08Ю применяли предварительное раскисление металла на выпуске ферросилицием. Использование кусков диаметром до 70 мм обеспечило его расплавление в течении не более 20 с (рис. 2). То есть присадка ферросилиция в начале выпуска позволяет кремнию быстро и полностью прореагировать с кислородом в первый период выпуска, до наполнения половины сталеразливочного ковша. При этом достигается пониженная до 300 – 600 ppm окисленность металла при отсутствии прироста содержания кремния, что позволяет увеличить степень усвоения и снизить количество присаживаемого далее алюминия. Проведенные исследования и контроль окисленности металла после продувки в конвертере позволили дифференцировать порцию ферросилиция и, как следствие, снизить и стабилизировать расход алюминия.

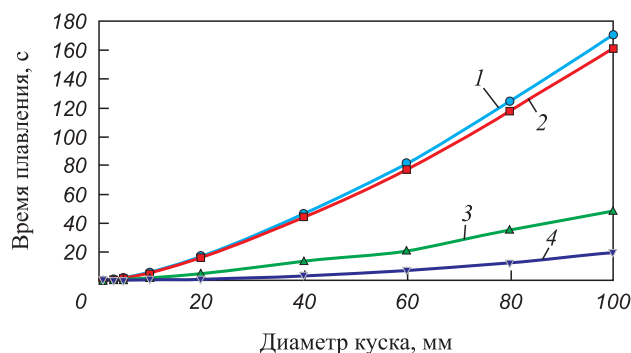


Рис. 2. Зависимость времени плавления используемых ферросплавов от фракционного состава для стали марки 08Ю при температуре ванны 1650 °C:
1 – FeMn78; 2 – FeMn88; 3 – FeSi65; 4 – AV87

Fig. 2. Dependence of melting time of the ferroalloys used on fractional composition for 08Yu steel at bath temperature of 1650 °C:
1 – FeMn78; 2 – FeMn88; 3 – FeSi65; 4 – AV87

Стали с содержанием кремния не более 0,03 и 0,04 % при концентрации марганца до 0,9 и 0,9 – 1,5 % соответственно, с содержанием серы не более 0,015 % условно выделены в группу низкокремнистых низкосернистых (НКНС) сталей (например, сталь марки S355MC). Производство их предполагает проведение десульфурации, в том числе в сталеразливочном ковше, так как в существующих условиях по содержанию серы в чугуна, загрузки установок десульфурации чугуна (УДЧ) и качеству металлического лома достичь необходимой массовой доли серы можно только за счет комплексного снижения ее содержания на всех технологических стадиях. Таким образом, необходимо было решить противоречащие задачи: с одной стороны, минимизировать степень усвоения кремния металлом из марганецсодержащих материалов (для этого надо обеспечить довольно высокую окисленность металла),

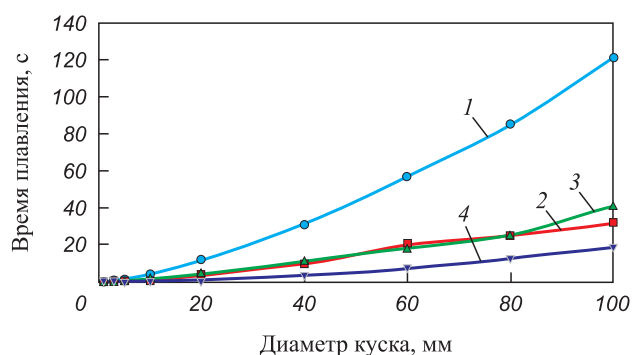


Рис. 3. Зависимость времени плавления используемых ферросплавов от фракционного состава для стали марки Э3А при температуре ванны 1650 °C:
1 – MnSi17; 2 – FeSi75; 3 – FeSi65; 4 – AV87

Fig. 3. Dependence of melting time of the ferroalloys used on fractional composition for E3A steel at bath temperature of 1650 °C:
1 – MnSi17; 2 – FeSi75; 3 – FeSi65; 4 – AV87

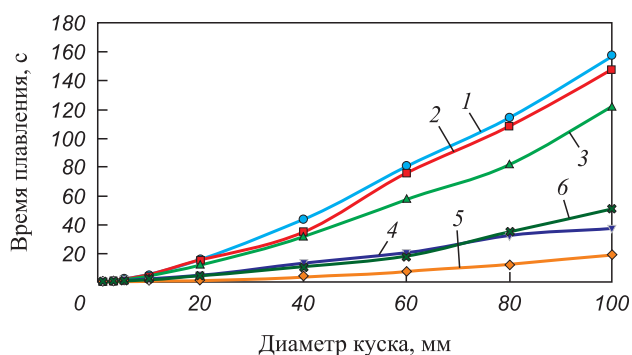


Рис. 4. Зависимость времени плавления используемых ферросплавов от фракционного состава для стали марки S355MC при температуре ванны 1650 °C:
1 – FeMn78; 2 – FeMn88; 3 – MnSi17; 4 – FeSi65; 5 – AV87; 6 – SiCa15

Fig. 4. Dependence of melting time of the ferroalloys used on fractional composition for S355MC steel at bath temperature of 1650 °C:
1 – FeMn78; 2 – FeMn88; 3 – MnSi17; 4 – FeSi65; 5 – AV87; 6 – SiCa15

с другой стороны, требуется полностью раскислить металл для удаления серы.

С началом выпуска из конвертера НКНС сталей присаживали науглероживатель (коквик), известь и плавиковый шпат для наведения шлака, марганецсодержащие ферросплавы. Требуемое время паузы после присадки марганецсодержащих ферросплавов в зависимости от используемой марки составляет до 100 с. Вводимый затем алюминий расплавляется достаточно быстро: менее чем за 19 с (рис. 4). В связи с полученными данными о времени плавления выдерживали паузу после ввода материалов, обеспечивающую расплавление ферросплавов и окисление кремния, вносимого этими добавками, затем присаживали алюминий АВ87. Окончательное глубокое раскисление и, как следствие, создание условий для десульфурации обеспечивали на следующей технологической стадии при внепечной обработке стали.

Выводы

В результате математического моделирования времени плавления ферросплавов марок ФМн78, ФМн88, МнС17, ФС65, ФС75, СК15, а также АВ87 в расплаве стали марок 08Ю, 3сп, Э3А и S355MC изучены особенности механизма плавления кусковых ферросплавов. Для каждой марки ферросплава построены зависимости времени плавления ферросплавов и алюминия в жидкой стали от их фракционного состава. Показано, что основным фактором, влияющим на время растворения кускового ферросплава в жидкой стали, является его фракция. Наибольшим временем плавления из рассмотренных ферросплавов характеризуется ферромарганец марки ФМн78, общее время плавления куска ферросплава диаметром 100 мм в стали 08Ю может превышать 160 с при температуре ванны 1650 °С. Снижение диаметра куска данного ферросплава до 60 мм приводит к двукратному сокращению времени его плавления. На основании проведенных исследований разработаны рациональные условия, установлены технологические особенности присадки марганец- и кремнийсодержащих ферросплавов при производстве стали марок 08Ю, 3сп, Э3А и S355MC.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Лозовая Е.Ю. Изучение кинетики плавления ферросплавов в железоуглеродистом расплаве. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург; 2001:23.
2. Никулин А.Ю. Математическое моделирование кинетики растворения реагентов при внепечной обработке черных металлов. Автореф. дис. ... док-ра техн. наук. Магнитогорск; 1997:44. (In Russ.).
3. Жучков В.И., Носков А.С., Завьялов А.Л. Растворение ферросплавов в жидком металле. Свердловск: УрО АН СССР; 1990:134.
4. Девятков Д.Х. Математическое моделирование и оптимальное управление в металлургии: Монография. Магнитогорск: МГТУ; 2007:350.
5. Kel I.N., Zhuchkov V.I., Renev D.S., Lozovay E.Y., Galiahetova R. Study of the physicochemical characteristics of complex boron-containing ferroalloys. *AIP Conference Proceedings*. 2020;2313(1):050015. <https://doi.org/10.1063/5.0032689>
6. Заякин О.В., Кель И.Н., Ренев Д.С., Сычев А.В., Михайлова Л.Ю., Долматов А.В. Физико-химические характеристики новых комплексных ниобийсодержащих сплавов. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2023;66(5):616–622. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-5-616-622>
Zayakin O.V., Kel' I.N., Renev D.S., Sychev A.V., Mikhailova L.Yu., Dolmatov A.V. Physicochemical characteristics of new complex niobium-containing alloys. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2023;66(5):616–622. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-5-616-622>
7. Radune M., Radune A., Assous F., Zinigrad M. Modeling and computer simulation of reagents diffusion in high temperature diffusion controlled heterogeneous reactions. *Archives of Computational Materials Science and Surface Engineering*. 2009;1(4):225–231.
8. Zhang L., Oeters F. Mathematical modelling of alloy melting in steel melts. *Steel Research*. 1999;70(4-5):128–134. <https://doi.org/10.1002/srin.199905615>
9. Arya A., Singh A.K. Effect of natural convection on formation and melting of shell around low melting point additives. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2025;56: 20167–2186. <https://doi.org/10.1007/s11663-025-03466-2>
10. Jardón-Pérez L.E., Ramírez-Argaéz M.A., Conejo A.N. Melting rate of spherical metallic particles in its own melt: effect of particle temperature, bath temperature, particle size and stirring conditions. *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2019;72(9):2365–2373. <https://doi.org/10.1007/s12666-019-01688-y>
11. Петров А.Ф., Снигура И.Р., Головкин Л.А., Цюпа Н.А. Прогнозирование времени плавления комплексных ферросплавов методом физико-химического моделирования. *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2019;(33):205–214. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2019-33-205-214>
Petrov A.F., Snigura I.R., Golovko L.A., Cupa N.A. Predicting the melting time of complex ferroalloys by the method of physico-chemical modeling. *Fundamental and Applied Problems of Ferrous Metallurgy*. 2019;(33):205–214. (In Russ.). <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2019-33-205-214>
12. Снегирев Ю.В., Тутарова В.Д. Сравнение математических моделей растворения реагентов в жидкой стали. *Вестник Национального технического университета Харьковский политехнический институт. Серия: Информатика и моделирование*. 2013;(39(1012)):189–198.
Snegirev Yu.V., Tutarova V.D. Comparison of mathematical models of reagent creation in liquid steel. *Bulletin of the National Technical University Kharkiv Polytechnic Institute. Series: Informatics and modeling*. 2013;(39(1012)): 189–198. (In Russ.).
13. Wang J., Song S., Ke X., Nyembwe A., Xue Z. Characterization of LC/HC-FeMn alloys and their melting mechanism in

- the molten iron. *Journal of Materials Research and Technology*. 2023;27:7740–7747.
<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.11.211>
14. Oeters F., Zhang L., Hauler C., Leitner J. Laboratory experiments and process modelling of the melting and dissolution of low-density ferro-molybdenum in steel melts. *Steel Research*. 2000;71(10):381–390.
<https://doi.org/10.1002/srin.200001333>
 15. Kumar R., Chandra S. Prediction of dissolution time of ferromanganese in hot metal and steel bath. In: *Proceedings of the National Seminar on Computer Applications in Materials & Metallurgical Engineering*. Jamshedpur: NML; 1996:81–86.
 16. Argyropoulos S.A., Sismanis P.G. The mass transfer kinetics of niobium solution into liquid steel. *Metallurgical Transactions B*. 1991;22(4):417–427.
<https://doi.org/10.1007/BF02654280>
 17. Taniguchi S., Ohmi M., Ishiura S. A hot model study on the effect of gas injection upon the melting rate of solid sphere in a liquid bath. *Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan*. 1983;23(7):571–577.
<https://doi.org/10.2355/isijinternational1966.23.571>
 18. Argyropoulos S.A., Guthrie R.I.L. The exothermic dissolution of 50 wt.% ferro-silicon in molten steel. *Canadian Metallurgical Quarterly*. 1979;18(3):267–281.
<https://doi.org/10.1179/cmqr.1979.18.3.267>
 19. Sismanis P.G., Argyropoulos S.A. Modelling of exothermic dissolution. *Canadian Metallurgical Quarterly*. 1988;27(2):123–133.
<https://doi.org/10.1179/cmqr.1988.27.2.123>
 20. Петров А.Ф., Ворона Е.Н. Моделирование теплофизических свойств различных групп ферросплавов. *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. 2005;(10):207–212.
 Petrov A.F., Vorona E.N. Modeling of thermophysical properties of various groups of ferroalloys. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*. 2005;(10):207–212. (In Russ.).

Сведения об авторах

Information about the Authors

Алексей Игорьевич Дагман, к.т.н., руководитель экспертного направления «Сквозные металлургические процессы производства железа и стали» дирекции по разработке новых технологий процесса, ПАО «Новолипецкий металлургический комбинат»
ORCID: 0009-0002-3491-6589
E-mail: dagman_ai@nlmk.com

Владимир Станиславович Ильичев, начальник отдела, Конвертерный цех № 1, ПАО «Новолипецкий металлургический комбинат»
E-mail: ilyichev_vs@nlmk.com

Евгений Николаевич Тюленев, начальник отдела Управления сквозной оптимизации технологии и регламентации, ПАО «Новолипецкий металлургический комбинат»
E-mail: tyulenev_en@nlmk.com

Олег Вадимович Заякин, член-корреспондент РАН, д.т.н., главный научный сотрудник, заведующий лабораторией стали и ферросплавов, Институт металлургии имени академика Н.А. Ватолы Уральского отделения РАН
ORCID: 0009-0009-9831-1993
E-mail: zferro@mail.ru

Владимир Иванович Жучков, д.т.н., профессор, главный научный сотрудник лаборатории стали и ферросплавов, Институт металлургии имени академика Н.А. Ватолы Уральского отделения РАН
ORCID: 0000-0002-8621-7467
E-mail: ntm2000@mail.ru

Илья Николаевич Кель, к.т.н., старший научный сотрудник лаборатории стали и ферросплавов, Институт металлургии имени академика Н.А. Ватолы Уральского отделения РАН
ORCID: 0000-0001-6411-6932
E-mail: dunnington@mail.ru

Дмитрий Сергеевич Ренев, младший научный сотрудник лаборатории стали и ферросплавов, Институт металлургии имени академика Н.А. Ватолы Уральского отделения РАН
ORCID: 0000-0002-4850-5273
E-mail: sense199@mail.ru

Aleksei I. Dagman, Cand. Sci. (Eng.), Head of the Expert Direction of the Directorate of Development of New Process Technologies, PJSC "Novolipetsk Steel"
ORCID: 0009-0002-3491-6589
E-mail: dagman_ai@nlmk.com

Vladimir S. Il'ichev, Head of Department, BOF Shop No. 1, PJSC "Novolipetsk Metallurgical Plant"
E-mail: ilyichev_vs@nlmk.com

Evgenii N. Tyulenev, Head of Department, Management of End-to-End Optimization of Technology and Regulation, PJSC "Novolipetsk Metallurgical Plant"
E-mail: tyulenev_en@nlmk.com

Oleg V. Zayakin, Corresponding Member of RAS, Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher, Head of the Laboratory of Steel and Ferroalloys, Vatulinsk Institute of Metallurgy of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences
ORCID: 0009-0009-9831-1993
E-mail: zferro@mail.ru

Vladimir I. Zhuchkov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Chief Researcher of the Laboratory of Steel and Ferroalloys, Vatulinsk Institute of Metallurgy of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences
ORCID: 0000-0002-8621-7467
E-mail: ntm2000@mail.ru

Il'ya N. Kel', Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher of the Laboratory of Steel and Ferroalloys, Vatulinsk Institute of Metallurgy of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences
ORCID: 0000-0001-6411-6932
E-mail: dunnington@mail.ru

Dmitrii S. Renev, Junior Researcher of the Laboratory of Steel and Ferroalloys, Vatulinsk Institute of Metallurgy of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences
ORCID: 0000-0002-4850-5273
E-mail: sense199@mail.ru

Вклад авторов

Contribution of the Authors

А. И. Дагман – постановка задачи, анализ результатов исследования.

В. С. Ильичев – описание промышленных результатов.

Е. Н. Тюленев – выбор и обоснование граничных условий для проведения моделирования.

О. В. Заякин – постановка задачи, описание результатов исследования, формулирование выводов.

В. И. Жучков – обсуждение и анализ полученных данных, редактирование текста публикации.

И. Н. Кель – поиск и анализ литературы.

Д. С. Ренев – проведение математического моделирования.

A. I. Dagman – conceptualization, analysis of research results.

V. S. Il'ichev – description of industrial results.

E. N. Tyulenev – selection and justification of boundary conditions for the study.

O. V. Zayakin – conceptualization, description of research results, formulation of conclusions.

V. I. Zhuchkov – discussion and analysis of the obtained data, manuscript editing.

I. N. Kel' – literature review and analysis.

D. S. Renev – numerical simulation.

Поступила в редакцию 29.10.2025

После доработки 01.12.2025

Принята к публикации 12.01.2026

Received 29.10.2025

Revised 01.12.2025

Accepted 12.01.2026