



УДК 669.15-198

DOI 10.17073/0368-0797-2025-5-476-481



Оригинальная статья

Original article

КОРРЕЛЯЦИЯ СТРУКТУРЫ И ХАРАКТЕРИСТИК ФЕРРОСПЛАВОВ

И. Н. Кель[✉], В. И. Жучков, О. В. Заякин

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

dunnington@mail.ru

Аннотация. В статье представлен обзор исследований взаимосвязи структуры и фазового состава со свойствами ферросплавов, а также их влияния на качество обрабатываемых металлов. Требования, предъявляемые к ферросплавам, включают в себя не только химический состав, но и ряд свойств: рациональную температуру плавления, устойчивость к окислению, плотность и время растворения в обрабатываемом расплаве. Структура и фазовый состав сплавов также имеют решающее значение, поскольку они влияют на рассыпаемость, ликвацию элементов в объеме слитка, способность к дроблению и образованию мелких фракций. В работе приведены результаты исследований, направленных на решение проблемы самопроизвольного рассыпания ферросилиция, вызванного эвтектидным превращением лебнита и наличием примесей. Предложены методы борьбы с дезинтеграцией ферросплава путем быстрого охлаждения, снижения доли примесей и стабилизации структуры с помощью таких добавок, как бор. В статье рассмотрены структурные особенности других сплавов, например, силикокальция, где улучшение дробимости достигается за счет замедления кристаллизации и изменения фазового состава. Обсуждаются подходы к моделированию фазового состава ферросплавов, включая термодинамически-диаграммный метод и анализ полигональных диаграмм состояния. Результаты исследований по быстрому охлаждению модификаторов демонстрируют повышенную эффективность за счет мелкодисперсной структуры и равномерного распределения активных элементов. Установлено, что структура ферросплавов влияет на первичную кристаллизацию чугуна, определяя морфологию графита и матрицы. Показано влияние фазового состава и типа неметаллических включений (оксиды, сульфиды) ферросплавов на свойства стали. На основе проведенного обзора подчеркивается необходимость учета структурно-фазовых характеристик ферросплавов, что позволит повысить качество металлургической продукции, снизить расход материалов и минимизировать негативные эффекты.

Ключевые слова: структура, фазовый состав, ферросплав, включения, модификаторы, физико-химические свойства

Благодарности: Исследование выполнено по государственному заданию Института металлургии имени академика Н.А. Ватолина Уральского отделения РАН.

Для цитирования: Кель И.Н., Жучков В.И., Заякин О.В. Корреляция структуры и характеристик ферросплавов. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2025;68(5):476–481. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2025-5-476-481>

CORRELATION BETWEEN THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF FERROALLOYS

I. N. Kel'[✉], V. I. Zhuchkov, O. V. Zayakin

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

dunnington@mail.ru

Abstract. The paper reviews the studies on relationship between the structure, phase composition, and properties of ferroalloys, as well as their impact on the quality of treated metals. The requirements for ferroalloys include not only chemical composition but also a range of properties: optimal melting temperature, oxidation resistance, density, and time of dissolution in the treated melt. The structure and phase composition of the alloys are also crucial, as they affect friability, element segregation within the ingot, crushability, and formation of fine fractions. The study presents research findings aimed at addressing the issue of spontaneous disintegration of ferrosilicon caused by the eutectoid transformation of leboite and presence of impurities. Methods to prevent ferroalloy disintegration are proposed, including rapid cooling, reducing impurity content, and stabilizing the structure through additives such as boron. The structural features of other alloys, such as silicocalcium, are also examined, where improved crushability is achieved by slowing crystallization and modifying phase composition. Approaches to modeling the phase composition of ferroalloys are discussed, including thermodynamic-diagram methods and polygonal phase diagram analysis. The results of studies on rapid cooling of modifiers demonstrate enhanced efficiency due to the fine-grained structure and uniform distribution of active elements. It was established that the structure of ferroalloys influences the primary crystallization of cast iron, determining graphite morphology and matrix structure. The impact of phase

composition and non-metallic inclusions (oxides, sulfides) in ferroalloys on steel properties is also demonstrated. Based on the review, the necessity of considering the structural and phase characteristics of ferroalloys is highlighted, as this can improve metallurgical product quality, reduce material consumption, and minimize adverse effects.

Keywords: structure, phase composition, ferroalloy, inclusions, modifiers, physicochemical properties

Acknowledgements: The work was performed according to the state assignment for the Vatolin Institute of Metallurgy of the Ural Branch of RAS.

For citation: Kel' I.N., Zhuchkov V.I., Zayakin O.V. Correlation between the structure and properties of ferroalloys. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2025;68(5):476–481. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2025-5-476-481>

Приоритетной задачей металлургии является разработка новых видов металлопродукции, способных сохранять свои эксплуатационные характеристики в экстремальных условиях окружающей среды. Поэтому создание металла с улучшенными свойствами, появление новых прогрессивных технологий его выплавки приводят к возрастанию интереса и более глубокому изучению физико-химических характеристик ферросплавов, влияющих на эти свойства.

Данные обстоятельства вызывают необходимость получения ферросплавов, обладающих низкой температурой плавления и окисляемостью, оптимальной плотностью, минимальным временем растворения и охлаждения жидкой стали при их вводе. Следует отметить, что качество ферросплавов связано не только с их химическим составом, загрязненностью вредными примесями и насыщенностью газами, но и с рассыпаемостью, ликвацией элементов в объеме слитка, магнитными свойствами, способностью к дроблению и образованию мелких фракций.

На основе учета этих требований в ИМЕТ УрО РАН предложена схема создания новых композиций комплексных ферросплавов, которые, более эффективно воздействуя на служебные характеристики обрабатываемого металла, лучше усваиваются сталью, быстрее растворяются и меньше ее загрязняют [1]. Наиболее полно были изучены температура плавления, плотность, окисляемость ферросплавов, величина теплового эффекта при взаимодействии со сталью, время плавления в металлическом расплаве, а также их теплофизические характеристики. В то же время взаимосвязи структуры, фазового состав ферросплавов с их характеристиками было уделено незаслуженно мало внимания.

В справочниках и монографиях [2 – 4] приведены данные о фазовом составе промышленных марочных сортов различных ферросплавов. Для каждого сплава эти данные могут значительно варьироваться, поскольку они находятся в зависимости от метода разливки и скорости кристаллизации слитков.

Необходимо отметить, что структура и фазовый состав ферросплава оказывают влияние как на свойства самого сплава (температуру плавления, твердость, прочность и др.), так и на характеристики обрабатываемого металла (чугуна или стали), например, при его модифицировании.

К структуре ферросплавов исследователи стали обращаться в связи с частыми случаями самопроиз-

вольного рассыпания ферросилиция [1; 5; 6]. Его структурные составляющие представляют интерметаллические фазы (силициды): Fe_2Si (β -фаза), Fe_5Si_3 (η -фаза) и FeSi_2 (ξ -фаза – лебоит), которые имеют две аллотропические модификации – высоко- и низкотемпературную. При охлаждении закристаллизовавшегося сплава в метастабильном лебоите протекают начальные стадии эвтектоидного превращения, т. е. происходит образование зон Гинье-Престона, а возникающие упругие напряжения приводят к растрескиванию структурных составляющих. Этот процесс также связан с наличием неустойчивых избыточных фаз слитка при нахождении его во влажной атмосфере.

Отмечено, что даже при стандартном содержании фосфора (0,03 – 0,04 %) ферросилиций с 49 – 51 % Si подвержен рассыпанию. При формировании избыточных фаз в структуре 75 %-ного ферросилиция (ФС75), инициирующих рассыпание слитков с выделением ядовитых газов PH_3 и AsH_3 , в основном принимают участие три элемента – кальций, алюминий и фосфор. Кремний и железо в составе этих фаз стабилизируют их устойчивость и снижают склонность слитков к рассыпанию во влажной атмосфере. При наличии в расплаве даже небольшого количества мышьяка он концентрируется в фазах с кальцием, алюминием и фосфором.

Согласно данным работ [1; 5], рассыпание ферросилиция связано с рядом факторов: эвтектоидным превращением лебоита; ликвацией кремния с образованием большого количества объединенного кремнием расплава; повышенным содержанием в сплаве примесных элементов (Al, Ca, Ti, As, P, S, C), склонных к образованию фосфидов, которые активно взаимодействуют с влагой воздуха.

При изучении методом электронной микроскопии образцов рассыпающегося ферросилиция по границам трещин в сплаве обнаружен алюминий, который значительно ликвирует, в том числе в виде фосфида AlP . Это приводит в слитках сплава ФС65 к образованию в структуре областей, склонных к рассыпанию. Помимо значительного количества фосфидов алюминия в рассыпающемся сплаве выявлены фосфиды титана и арсениды магния, которые также могут являться источниками трещинообразования.

В ходе анализа структуры ферросплавов установлены причины рассыпания ФС65: пониженное содержание кремния (<65 %); повышенное содержание

алюминия ($>1\%$), в том числе в виде фосфидов; развитие ликваций, связанное с условиями разливки и кристаллизации. На основе этих данных создаются предпосылки для образования структурно нестабильного лебонита и для локализации в отдельных частях слитка примесей – фосфидов, которые ответственны за рассыпание ФС65 при взаимодействии с влагой воздуха.

По мнению авторов работы [5], мерами борьбы с дезинтеграцией ферросилиция являются быстрая кристаллизация сплава, способствующая предотвращению ликвации кремния и других компонентов сплава; снижение в сплаве долей фосфора, кальция и алюминия; стабилизация ферросилиция вводом в расплав некоторых элементов, например, бора.

Известен случай [7], когда из-за рассыпания не получил должного применения новый эффективный сплав (АМС), содержащий следующие компоненты, мас. %: 60 – 65 Mn; 25 – 30 Si; 5 – 8 Al. Производство этого сплава отличалось высокой технико-экономической эффективностью, а применение при раскислении стали позволяло повышать ее при значительном снижении расхода ферросплавов. Однако данный сплав был подвержен значительному рассыпанию при хранении на воздухе с выделением взрывоопасных газов, содержащих PH_3 . В ходе изучения структуры сплава было установлено, что причиной его рассыпания является взаимодействие фосфидов и карбидов с влагой воздуха. Авторами работы [7] также сообщается, что причинами рассыпания АМС могут быть: взаимодействие карбида алюминия с водой и образование гидроксида алюминия и металла; полиморфные превращения в фазе $\text{Mn}_4\text{Si}_2\text{Al}_3$ и твердом растворе кремния с Mn и Al, которые инициируют рост микротрещин, приводящих к разрушению сплава.

Другой отрицательной стороной характеристики ферросплавов является их плохая дробимость, которая оказывает влияние на износ дробильного оборудования и усложнение разливки.

Авторами работы [8] было изучено влияние структуры и фазового состава силикокальция СК15 (15 % Ca, 20 % Fe, 1 % Al, 0,2 % C, остальное Si) на его дробимость. Основными фазами данного сплава являются FeSi_2 и CaSi , соотношение которых находится в прямой зависимости от содержания кальция в сплаве (10 – 30 мас. %). Было установлено, что примесные элементы образуют в силикокальции ряд структурно свободных фаз в виде мелких выделений CaAl_2Si_2 , $\text{Ba}(\text{Si}, \text{Al})_4$, Ca_2MgSi_3 и др. Наличие в сплаве СК15 большого количества мелких округлых кристаллов типа FeSi_2 измельчает структуру сплава и делает его труднодробимым. Для улучшения его дробимости предложено замедление скорости кристаллизации с целью получения крупнозернистой структуры и снижение содержания железа. Добавки хрома, марганца, никеля и меди приводят к образованию дисилицидов этих элементов и видоизменяют фазы CaSi_2 , что оказывает влияние

на свойства силикокальция, в частности, улучшает его пожаровзрывобезопасность.

Разработаны подходы к моделированию фазового состава ферросплавов. А.А. Акбердиным и др. [9] предложен термодинамически-диаграммный метод оценки фазового состава ферросплавов, который заключается в построении тройных или четверных фазовых диаграмм с позиции геометрических закономерностей диаграмм состояния. На их основе формулируются математические закономерности, показывающие наиболее вероятный фазовый состав сплавов.

Другим методом является прогнозирование фазового состава ферросплавов с помощью анализа структурно-химического состояния конденсированных фаз полигональной диаграммы состояния (ПДС), предложенный Б.Ф. Беловым и др. [10]. Он основан на геометрическом разделении концентрационного треугольника полевыми (ребро–ребро) или лучевыми (вершина–ребро) линиями. Точки их пересечения являются продуктами химических реакций, т. е. фазами тройной системы.

Изучением влияния структуры и фазового состава ферросплавов на свойства обрабатываемого ими металла начали заниматься только в конце прошлого века. В работах И.Г. Бродовой и др. [11 – 13] установлено, что структура лигатурных сплавов (размеры и дефектность строения кристаллов интерметаллидов Al_3Zr) оказывает влияние на эффективность легирования и модифицирования алюминиевых сплавов цирконием.

Получением и применением закаленных микрокристаллических кремнистых ферросплавов с щелочноземельными металлами и Mg, их влиянием на свойства чугуна занимались И.В. Рябчиков и его коллеги [14 – 16].

В работе [14] проведено сравнение эффективности применения при обработке чугуна магнийсодержащего модификатора (48 % Si; 5 – 6 % Mg; 2 % Ca; 6 % РЗМ; остальное Fe) двух видов: быстроохлажденного между двумя вращающимися медными вальками и разлитого в слитки.

Быстроохлажденный или чипсовый модификатор по структуре значительно отличался от слитка. Его структурные составляющие были в 10 – 100 раз меньше, при этом химически активные элементы в объеме слитка распределены более равномерно. При обработке чугуна быстроохлажденными модификаторами было отмечено снижение глубины отбела с 7 до 4 мм. Кроме этого, расход лигатуры-модификатора снизился на 25 – 30 % при одинаковой эффективности модифицирования. Быстроохлажденные модификаторы легко измельчались, при этом достигался более высокий выход годных фракций, а также они имели меньшую склонность к переизмельчению, чем обычный модификатор.

Сравнительная оценка морфологии, приведенная в работе [14], показала, что для обоих видов модификатора основными фазами являются: FeSi_2 ; сво-

бодный кремний; магнийсодержащие фазы (Mg_2Si , $CaMgSi_x$) и небольшое количество (менее 0,1 %) рентгеноаморфного $SiMgO$ (по данным РСМА и рентгенофазового анализа). Отличие фазового состава чипсовых модификаторов от слиточных по данным рентгенофазового анализа не отмечено. Металлографическими методами четких границ для разделения магнийсодержащих фаз получить не удалось. Замечено отличие по доле, занятой различными фазами: количество фазы $FeSi_2$ в слитке в среднем на 4 % больше, чем в чипсах; количество свободного кремния в слитках на 7 % больше; кремниевая магнийсодержащая фаза в чипсах превышает содержание в слитках в среднем на 12,7 %. Таким образом, фаза, содержащая элементы, обеспечивающие эффект модифицирования, занимает большую площадь в образце чипсового модификатора по сравнению со слиточным. Кроме того, модификаторы отличаются размерами пластин фазы $FeSi_2$. Так толщина пластин дисилицида железа в слитках в пять раз больше, чем толщина магнийсодержащей фазы. Для чипсовых модификаторов размеры этих фаз имеют близкие значения. По мнению авторов, это обеспечивает более равномерное распределение элементов-модификаторов по сечению образца, более быстрое их растворение и лучшее усвоение при модифицировании чипсами.

Дальнейшее развитие исследований по влиянию микроструктуры ферросплавов на свойства обрабатываемого металла приводилось в работах А.Г. Панова, Д.А. Болдырева, Э.С. Закирова и др. [17 – 19].

Авторы работ [17; 19] объясняют влияние структуры модификатора на свойства чугуна протеканием процессов первичной кристаллизации, изменяющей морфологию, количество графита и матрицы в структуре обрабатываемого металла.

Перешедшие в чугуновый расплав из модификатора структуры $FeSi$ и $\alpha-FeSi_2$ взаимодействуют с элементами структуры расплава, имеющими ближний порядок цементита. В результате этого перераспределяются химические связи между атомами Fe , Si и C , образуются новые обедненные углеродом структуры $Fe-C-Si$, являющиеся при последующем охлаждении расплава предзародышами и зародышами феррита и аустенита. Поэтому в чугунах, обработанных крупнокристаллическими модификаторами, активнее протекает первичная кристаллизация графита, аустенита и феррита, а в чугунах, обработанных мелкокристаллическими модификаторами, первичная кристаллизация графита, аустенита и феррита подавляется и кристаллизуются цементит и ледебурит.

Наследуемые чугуновым расплавом от модификатора структуры модификаторов Mg_2Si участвуют в формировании разупорядоченных областей чугунового расплава, их размеры влияют на интенсивность удаления магния и неметаллических включений из расплава. Это

влияет на количественные характеристики и морфологию графита, а измельчение магнийсодержащих фаз приводит к повышению сфероидизирующего и графитизирующего эффектов.

Кроме структуры и фазового состава ферросплава, на качество обрабатываемого им металла оказывают влияние содержащиеся в нем неметаллические включения (окисидные, сульфидные и др.) [20 – 25].

Исследователями установлено [20 – 22], что ферросилиций содержит некоторое количество SiO_2 , который при легировании переходит в сталь и дополнительно загрязняет ее.

Авторами работы [24] изучены неметаллические включения ферротитана и их поведение при легировании стали. Данный ферросплав содержит крупные нерегулярные включения, состоящие в основном из CaO и SiO_2 , которые при попадании в обрабатываемый металл трансформируются в сферические включения, содержащие TiO_2 , Al_2O_3 и CaO .

В работе [25] проведено исследование влияния включений феррониобия на ранние этапы процесса его растворения во время микролегирования стали. В ходе работы был сформулирован механизм появления в стали включений $Al-O$ и $Al-Ti-Nb-O$. По мнению авторов, включения $Ti-O$ трансформируются в гетерогенные включения с ядром $Ti-O$, покрытым внешним слоем $Nb-Ti-O$.

Выводы

Приведенный обзор показал необходимость учета строения ферросплавов, возможности изменения свойств как самого сплава, так и обрабатываемого им металла путем преобразования структуры и фазового состава ферросплава.

В связи с этим следует продолжать исследования в направлениях воздействия термовременных условий охлаждения на изменение структуры фаз ферросплавов и расширения видов изучаемых сплавов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Жучков В.И., Заякин О.В., Михайлова Л.Ю. Физическая химия и технология в металлургии. Екатеринбург: ООО Универсальная типография «Альфа-Принт»; 2021:272.
2. Гасик Л.Н., Игнатьев В.С., Гасик М.И. Структура и качество промышленных ферросплавов и лигатур. Киев: Техника; 1975:52.
3. Вертий И.Г., Рождественская Т.А., Михайлов Г.Г., Васильев В.И. Ферросплавы, шлаки, огнеупоры. Атлас микроструктур. Челябинск: Металл; 1994:112.
4. Исаков А.Д., Воронин Б.В. Ферросплавы, модификаторы, лигатуры: Справочник. Т. 1. Челябинск: Цицеро; 2009:259.
5. Захаров Р.Г., Петрова С.А., Жданов А.В., Жучков В.И. Изучение влияния структуры ферросилиция на его распыляемость. *Металлы*. 2014;(1):8–13.

- Zakharov R.G., Petrova S.A., Zhdanov A.V., Zhuchkov V.I. Effect of the structure of ferrosilicon on its desintegration. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2014;2014(1):3–16. <https://doi.org/10.1134/S0036029514010145>
6. Жучков В.И., Гасик М.И., Шешуков О.Ю. Структура и физико-химические характеристики ферросплавов. *Электromеталлургия*. 2006;(6):39–44.
- Zhuchkov V.I., Gasik M.I., Sheshukov O.Yu. Structure and physicochemical characteristics of ferroalloys. *Electrometallurgiya*. 2006;(6):39–44. (In Russ.).
7. Гасик М.И., Лякишев Н.П., Емлин Б.И. Теория и технология производства ферросплавов. Москва: Металлургия; 1988:784.
8. Поволоцкий В.Д., Комисарова Т.А., Чувашин И.И. Структура и фазовый состав силикокальция: Сборник научных трудов «Повышение эффективности и качества ферросплавов». Москва: Металлургия; 1986:96–100.
9. Хурметбек Ж., Джексембаев Д.М., Акбердин А.А. Математическая модель диаграммы фазового состава системы Fe–Ti–Al. *Вестник Восточно-Казахстанского государственного технического университета им. Д. Серикбаева*. 2016;(4):118–122.
- Khurmetbek Zh., Dzhaksembaev D.M., Akberdin A.A. Mathematical model of phase composition diagram of the Fe–Ti–Al system. *Vestnik of D. Serikbayev East Kazakhstan State Technical University*. 2016;(4):118–122. (In Russ.).
10. Белов Б.Ф., Бабанин А.Я., Бакин И.В. и др. Классификация сплавов системы железо – кремний – углерод. *Сталь*. 2019;(6):16–19.
- Belov B.F., Babanin A.Ya., Bakin I.V., etc. Classification of alloys in the iron-silicon-carbon system. *Stal'*. 2019;(6):16–19. (In Russ.).
11. Бродова И.Г., Поленц И.В., Попель П.С. Роль структуры литейных сплавов при модифицировании алюминиевых сплавов цирконием. *Физика металлов и металловедение*. 1993;76(5):123–131.
- Brodiva I.G., Polents I.V., Popel' P.S. The role of master alloy structure in zirconium modification of aluminum alloys. *Fizika metallov i metallovedenie*. 1993;76(5):123–131. (In Russ.).
12. Бродова И.Г., Башликов Д.В., Полентс И.В. Влияние времени выдержки на структуру и свойства быстро затвердевших алюминиевых сплавов с переходными металлами. *Materials Science Forum*. 1998;269–272:589–594. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.269-272.589>
13. Бродова И.Г., Полентс И.В., Башликов Д.В., Попель П.С., Чикова О.А. Механизм формирования ультрадисперсных фаз в быстро затвердевших алюминиевых сплавах. *Nanostructured Materials*. 1995;6(1–4):477–479. [https://doi.org/10.1016/0965-9773\(95\)00100-X](https://doi.org/10.1016/0965-9773(95)00100-X)
14. Рябчиков И.В., Соловьев Н.М. Кремнистые ферросплавы с мелкокристаллической структурой. *Научные труды «Производство стали и ферросплавов. Теория и практика»*. НИИМ: Челябинск; 1998:175–182.
15. Рябчиков И.В., Панов А.Г., Корниенко А.Э. О качественных характеристиках модификаторов. *Сталь*. 2007;(6):18–23.
- Ryabchikov I.V., Panov A.G., Kornienko A.E. On the quality characteristics of modifiers. *Stal'*. 2007;(6):18–23. (In Russ.).
16. Вязникова Е.А., Смирнова В.Г., Шешуков О.Ю., Жучков В.И., Заякин О.В., Рябчиков И.В. Влияние скорости охлаждения на структуру и фазовый состав магниесодержащих модификаторов. *Сталь*. 2008;(8):66.
- Vyaznikova E.A., Smirnova V.G., Sheshukov O.Yu., Zhuchkov V.I., Zayakin O.V., Ryabchikov I.V. Influence of cooling rate on the structure and phase composition of magnesium-containing modifiers. *Stal'*. 2008;(8):66. (In Russ.).
17. Панов А.Г. Влияние микроструктуры литых Fe–Mg–Ni легатур на кристаллизацию и микроструктуру модифицированного высокопрочного чугуна. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2010;53(11):55–60.
- Panov A.G. Effect of the microstructure of cast Fe–Mg–Ni master alloys on crystallization and microstructure of modified high-strength cast iron. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2010;53(11):55–60. (In Russ.).
18. Болдырев Д.А., Попова Л.И., Давыдов С.В. Фазовый электронно-микроскопический анализ и рентгено-спектральный микроанализ структуры ЧВГ-модификаторов. *Сталь*. 2018;(4):42–45.
- Boldyrev D.A., Popova L.I., Davydov S.V. Phase electron microscopy and X-ray microanalysis of the structure of CGI modifiers. *Stal'*. 2018;(4):42–45. (In Russ.).
19. Закиров Э.С. Повышение стабильности структуры и свойств ответственных деталей машиностроения из чугуна с шаровидными и вермикулярным графитом: Автореферат диссертации... кандидата технических наук. Казань; 2023:24.
20. Wang Y., Karasev A., Park J.H., Jönsson P.G. Non-metallic inclusions in different ferroalloys and their effect on the steel quality: A review. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2021;52:2892–2925. <https://doi.org/10.1007/s11663-021-02259-7>
21. Michelis S.K., Bernhard C. Significance of nonmetallic inclusions for the clogging phenomenon in continuous casting of steel – A review. *Steel Research International*. 2022;93(7):2200086. <https://doi.org/10.1002/srin.202200086>
22. Pindar S., Pande M.M. Investigation of inclusion characteristics in ferrosilicon killed high silicon steels. *Steel Research International*. 2024;95(9):2400331. <https://doi.org/10.1002/srin.202400331>
23. Wang J., Song Sh., Ke X., Nyembwe A., Xue Zh. Characterization of LC/HC-FeMn alloys and their melting mechanism in the molten iron. *Journal of Materials Research and Technology*. 2023;27:7740–7747. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.11.211>
24. Kellner H.E.O., Karasev A.V., Memarpour A., Jönsson P.G. Evolution of non-metallic inclusions from FeTi70R alloys during alloying of Fe–40Ni–20Cr steels. *Steel Research International*. 2016;87(11):1461–1468. <https://doi.org/10.1002/srin.201500428>
25. Wang Y., Karasev A., Park J.H., Jönsson P.G. Interfacial reactions and inclusion formations at an early stage of FeNb alloy additions to molten iron. *ISIJ International*. 2021;61(1):209–218. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2020-353>

Сведения об авторах

Information about the Authors

Илья Николаевич Кель, к.т.н., старший научный сотрудник лаборатории стали и ферросплавов, Институт металлургии имени академика Н.А. Ватолина Уральского отделения РАН

ORCID: 0000-0001-6411-6932

E-mail: dunnington@mail.ru

Владимир Иванович Жучков, д.т.н., профессор, главный научный сотрудник лаборатории стали и ферросплавов, Институт металлургии имени академика Н.А. Ватолина Уральского отделения РАН

ORCID: 0000-0002-8621-7467

E-mail: ntm2000@mail.ru

Олег Вадинович Заякин, член-корреспондент РАН, д.т.н., главный научный сотрудник, заведующий лабораторией стали и ферросплавов, Институт металлургии имени академика Н.А. Ватолина Уральского отделения РАН

ORCID: 0009-0009-9831-1993

E-mail: zferro@mail.ru

Ilya N. Kel', Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher of the Laboratory of Steel and Ferroalloys, Vatin Institute of Metallurgy of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences

ORCID: 0000-0001-6411-6932

E-mail: dunnington@mail.ru

Vladimir I. Zhuchkov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Chief Researcher of the Laboratory of Steel and Ferroalloys, Vatin Institute of Metallurgy of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences

ORCID: 0000-0002-8621-7467

E-mail: ntm2000@mail.ru

Oleg V. Zayakin, Corresponding Member of RAS, Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher, Head of the Laboratory of Steel and Ferroalloys, Vatin Institute of Metallurgy of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences

ORCID: 0009-0009-9831-1993

E-mail: zferro@mail.ru

Вклад авторов

Contribution of the Authors

И. Н. Кель – поиск и обобщение литературных данных, написание текста.

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

О. В. Заякин – анализ данных, редактирование текста.

I. N. Kel' – search and generalization of literary data, writing the text.

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

O. V. Zayakin – analysis of the obtained data, editing the text.

Поступила в редакцию 15.05.2025

После доработки 16.06.2025

Принята к публикации 17.06.2025

Received 15.05.2025

Revised 16.06.2025

Accepted 17.06.2025