ISSN 0024-449X

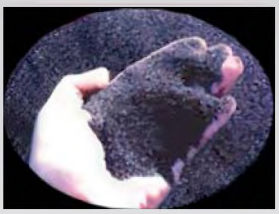
Литейное производство

5 2025

РОДОНИТ
•ЛИТЕЙНЫЕ МАТЕРИАЛЫ
•ОБОРУДОВАНИЕ • ТЕХНОЛОГИИ

Россия, г. Санкт-Петербург
www.rodonit.spb.ru

Один из ведущих поставщиков литейного оборудования и материалов для литейной промышленности


Наше предприятие поставляет высококачественные материалы и оборудование для литейной промышленности на протяжении 30 лет.

Мы предлагаем нашим клиентам материалы, позволяющие обеспечить высокое качество готовой продукции.

В ассортименте нашей продукции:
– Наполнители для формовочных, стержневых и облицовочных смесей: хромитовые, пески, плавленый кварц для литья по выплавляемым моделям,

– Связующие материалы для изготовления литейных форм различными способами, смолы всех типов, плакированные смеси для оболочкового литья и стержней по горячим ящикам,





– Противопригарные покрытия и вспомогательные материалы для форм и стержней: разделительные покрытия, клеи, материалы для уплотнения стыков форм,








– Экзотермические и теплоизоляционные оболочки прибылей, маты, экзотермический и теплоизолирующий порошок



– Материалы и оборудование для футеровки индукционных печей

Наши специалисты имеют большой опыт по эффективному использованию поставляемых материалов. Осуществляется технологическое сопровождение поставляемых материалов.

195067 Санкт-Петербург, Волго-Донской проспект, дом 1. www.rodonit.spb.ru, mail@rodonit.spb.ru
Телефоны +7 (821) 320 1613, 320 1689, 331-3616. Мобильный +7 (921) 917 5465

FOUNDRY. TECHNOLOGY & EQUIPMENT

МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
ИЗДАЕТСЯ С 1930 г.

РЕДАКЦИОННО-ИЗДАТЕЛЬСКИЙ СОВЕТ

ПИИРАЙНЕН В.Ю.
Главный редактор журнала

АФОНАСКИН А.В.
БАСТ Ю.
БУДАНОВ Е.Н.
ДЕЕВ В.Б.
ИВАНОВА В.А.
ИЛЛАРИОНОВ И.Е.
КЕЧИН В.А.
КИДАЛОВ Н.А.
КОНОВАЛОВ С.В.
КОРОТЧЕНКО А.Ю.
ЛЕУШИН И.О.
МАРУКОВИЧ Е.И.
НИКИТИН К.В.
НУРАЛИЕВ Ф.А.
ПАНОВ А.Г.
ПАНФИЛОВ Э.В.
ПОПОВ А.
СУЛИЦИН А.В.
ШАТУЛЬСКИЙ А.А.

Издательский дом
«ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО»
объявляет подписку
на электронные версии журнала
«ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО»,
(подробнее www.foundrymag.ru)

Литейное производство
№5
2025

СОДЕРЖАНИЕ • CONTENTS

2 От Главного редактора

К 80–летию Великой Победы. Литейщики в годы Великой Отечественной войны

Литейные сплавы. Отливки

6 **Болдырев Д.А.** Оптимизация химического состава чугуна ЧВГ40 для отливки «*вал распределительный*»
Boldyrev D.A. Optimization of the chemical composition of CGI40 cast iron for camshaft casting

12 **Скворцов Е.В., Исагулов А.З., Султангазиев Р.Б., Нарембекова А.К.** Влияние природы модификатора на свойства стали 35ХГСЛ после отжига
Skvortsov Ye.V., Isagulov A.Z., Sultangaziev R.B., Narembekova A.K. Influence of the nature of the modifier on the properties of 35KhGSL steel after annealing

18 **Семенов К.Г., Батышев К.А., Гардин П.А., Васияров А.В.** Исследование антифрикционных характеристик алюминиево-железных бронз
Semenov K.G., Batyshev K.A., Gardin P.A., Vasiyarov A.V. Study of anti-friction characteristics of aluminum-iron bronze

23 **Юмабаев А.А., Савинов А.С., Феоктистов Н.А., Михалкина И.В.**
Предупреждение брака литых прокатных валков в исполнении HiCr в процессе их изготовления
Yumabaev A.A., Savinov A.S., Feoktistov N.A., Mikhalkina I.V. Prevention of defects of cast rolling rolls in HiCr design during their manufacturing process

30 **Ракитин С.Р., Чеберяк О.И., Ларин М.А., Манцеров С.А.** Технология комбинированного рафинирования алюминиевых сплавов
Rakitin S.R., Cheberiak O.I., Larin M.A., Mantserov S.A. Technology of combined refining of aluminum alloys.

Литье в песчаные формы

34 **Емельянов В.О., Михайлов О.В., Дружевский М.А., Соколов А.В.** Применение технологии Resol-CO_2 для изготовления художественных отливок
Yemelyanov V.O., Mikhailov O.V., Druzhevsky M.A., Sokolov A.V. The use of Resol-CO_2 technology for the production of artistic casting

Информация. Хроника

39 Международные выставки **«Металлургия.Россия'2025», «Литмаш.Россия'2025» и «Трубы.Россия'2025».** Литейная индустрия: в фокусе инвестиций

40 **Выставка «Металлоконструкции'2025».**
Стальное строительство укрепляет свои позиции

УДК 621.74:
669.14

Ye.V. Skvortsov,
A.Z. Isagulov,
R.B. Sultangaziev,
A.K. Narembekova

Влияние природы модификатора на свойства стали 35ХГСЛ после отжига
Influence of the nature of the modifier on the properties of 35KhGSL steel after annealing

Е.В. Скворцов, А.З. Исагулов, Р.Б. Султангазиев, А.К. Нарембекова

Аннотация

Исследовали влияние эффекта наномодифицирования комплексным модификатором INSTEEL и карбидом титана на механические свойства и микроструктуру литой легированной стали 35ХГСЛ после термической обработки. Установлено, что ввод модификаторов в виде нанопорошка размером фракции менее 100 нм в количестве 0,1% от массы металла способствовал повышению дисперсности перлита и колоний феррита. Структурные изменения в металле привели к увеличению твердости, в среднем, на 24%; повышению предела прочности на 5%; увеличению ударной вязкости на 8,5%.

Ключевые слова
Среднелегированная сталь, наномодифицирование, структура, механические свойства, комплексный модификатор, карбид титана.

Summary

In this paper, the influence of the nanomodification effect with the complex modifier INSTEEL and titanium carbide on the mechanical properties and microstructure of cast alloy steel 35KhGSL after heat treatment was investigated. It was found that the introduction of modifiers in the form of nanopowder with a fraction dimension of less than 100 nm in an amount of 0.1% of the metal weight contributed to an increase in the dispersion of pearlite and ferrite colonies. Structural changes in the metal led to an increase in hardness by an average of 24%; an increase in tensile strength by 5%; an increase in impact toughness by 8,5%.

Keywords
Medium alloy steel, nanomodification, structure, mechanical properties, complex modifier, titanium carbide.

Введение

Наномодифицирование входит в число перспективных направлений улучшения структуры и свойств легированных сталей. В качестве наномодификаторов используются различные материалы: тугоплавкие оксиды и карбиды металлов, РЗМ, комплексные модификаторы и др. Предполагаемый механизм воздействия наномодифицирования на структуры заключается в образовании множества центров кристаллизации, что способствует образованию мелкого зерна и, соответственно, улучшению прочностных свойств.

В работах [1…5] в качестве наномодификаторов используются тугоплавкие соединения типа Zr, TiN, Y_2O_3, AlTi и др. и исследуется их влияние на свойства сплавов. Результаты данных исследований показали благотворное влияние введения данных наномодификаторов на прочность и ударную вязкость, при этом также значительно улучшились и специальные свойства – предел длительной прочности и предел ползучести.

Работы [6, 7] посвящены изучению воздействия наномодификаторов на износостойкость. В качестве наномодификаторов использовались структурированные композиционные материалы и химические соединения типа SiC, TiO_2 и др. В результатах всех указанных исследований наномодифицирования данными композициями отмечено повышение износостойкости от 5 до 20%.

Надо отметить, что в качестве объектов исследований, как правило, выбираются высоколегированные марки сталей: жаропрочные, жаростойкие, коррозионностойкие и т.п. Этот выбор вполне оправдан, так как стоимость наномодификаторов достаточно высока, что определяет повышенную себестоимость конечной продукции. Кроме того, технология ввода наномодификаторов в жидкую сталь тоже является достаточно сложной технической задачей, которая предполагает дополнительный технологический этап [8…10].

Работ, посвященных влиянию наномодифицирования на свойства среднелегированных сталей, значительно меньше, что связано с более низким уровнем механических свойств и менее ответственными областями применения сталей данного класса. Между тем, именно среднелегированные стали класса улучшаемых составляют большую часть сталей, применяемых в машиностроении.

Таким образом, несмотря на значительное количество исследований, посвященных наномодифицированию сталей, как способа улучшения свойств, остается много «открытых вопросов», связанных в первую очередь, с влиянием наномодифицирования на свойства среднелегированных сталей.

Цель работы – исследование влияния наномодификаторов на структуру и свойства стали 35ХГСЛ после термической обработки.

Материалы и методы

В качестве наномодификатора использовали два вида материалов: комплексный модификатор INSTEEL и карбид титана. Отличительной особенностью модификатора INSTEEL является его комплексный состав, который включает щелочно-земельные металлы (Ca и Ba), редкоземельный металл (La) и сильные карбидообразователи (Ti и Nb). На **рис. 1** приведен фазовый состав модификатора INSTEEL.

Надо отметить, что комплексный модификатор INSTEEL поставляется в виде «чипсов» или фракционированный и именно в таком виде используется для «классического» модифицирования стали. В данном исследовании модификатор INSTEEL применялся в виде нанопорошка,

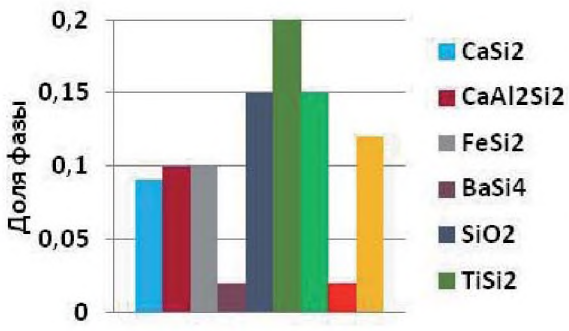


Рис. 1. Фазовый состав используемого модификатора INSTEEL

с целью повысить эффективность его воздействия, как стимулятора образования центров кристаллизации, а также сократить его расход. В качестве второго модификатора использовался карбид титана марки F 500 (ТУ 6-09-492-75).

Для получения нужной фракции каждый из используемых модификаторов подвергался измельчению в высокоскоростной наношаровой мельнице типа Emax (Retsch GmbH, Германия) с параметрами измельчения: размер размольных шаров – 12 мм; количество шаров – 6 шт.; продолжительность измельчения в непрерывном режиме – 60 мин; частота вращения – 1200 об./мин. После измельчения проводился фракционный анализ полученных порошков на фотоседиментометре мод. ФСХ-6К (Лабнаучприбор, Россия). Дисперсность измельченного порошка составляла ≤ 100 нм с содержанием данной фракции не менее 80% по массе.

Выплавку сплава проводили по технологии переплава легированных отходов в открытой индукционной транзисторной печи мод. УИ-25п (МТПП, Россия). Модификатор вводили в расплав после его раскисления в печи. Заливку стали в литейные формы осуществляли при температуре 1540°С.

Литейная форма из песчано-глинистой смеси представляла собой систему из стояка, шлакоуловителя, питателя и модели в виде цилиндра длиной до 300 мм и диаметром 30 мм. Металл заливался в стояк, откуда он сифонной заливкой (снизу вверх) поступал в цилиндрическую заготовку, которая далее использовалась для проведения необходимых испытаний.

Химический состав экспериментального сплава определяли с помощью спектрометра Foundry-Master Lab (Hitachi High-Tech, Германия). Экспериментальный сплав соответствовал требованиям по химическому составу ГОСТа 977-88 для стали 35ХГСЛ (**табл. 1**).

Выбор стали 35ХГСЛ (**табл. 1**) в качестве объекта исследования связан с широким распространением этого сплава на заводах Республики Казахстан. Сталь 35ХГСЛ используется в качестве материала для изготовления литых деталей металлургического оборудования, таких как, конвейерные звездочки, муфты, валы и другие детали, работающие в сложно-напряженных условиях.

Термическая обработка в виде отжига была реализована на муфельной печи Naberterm LHT02/17 (Германия) по режиму: нагрев до температуры аустенитизации, т. е. Ac3+(40…50) °С (880…890°С) со скоростью 100°С/ч, затем выдержка в печи из расчета 1 мин на 1 мм диаметра заготовки. Далее – охлаждение вместе с печью до 640°С со скоростью 30…40°С/ч, выдержка при температуре 640…660°С из расчета 1 мин на 1 мм диаметра заготовки, затем медленное охлаждение вместе с печью (скорость охлаждения 30…40°С/ч) до 400°С, а затем – на воздухе.

Металлографические исследования структуры образцов проводились на универсальном микроскопе Альтами МЕТ 5ДИК (Альтами, Россия) при увеличении в 400 раз. Подготовку шлифов для исследований выполняли согласно методическим рекомендациям Metalog Guide (Struers A/S, Дания).

Твердость (HV) определяли на твердомере мод. Willson 1150 (Buehler, Великобритания). На каждом образце были выполнены восемь измерений с вычислением среднего арифметического. Определение временного сопротивления на разрыв ($\sigma_в$, МПа) выполняли на испытательной машине INSTRON 5982 (Instron Technologies LLP, США) при комнатной температуре в соответствии с методикой, описанной в ГОСТ 1497-84. Испытания на ударную вязкость (KCU, Дж/см^2)

Таблица 1

Сплав	Химический состав, %						
	C	Cr	Mn	Si	S	P	Fe
Сталь 35ХГСЛ	0,3…0,4	0,6…0,9	1,0…1,3	0,6…0,8	≤ 0,04	≤ 0,04	Ост.
Экспериментальный сплав	0,32	0,73	1,07	0,77	0,015	0,021	Ост.

Таблица 2

Номер образца	Характеристика образца	Твердость, HV	$\sigma_в$, МПа	KCU, Дж/см^2
1	Сталь 35ХГСЛ	172	565	28,6
2	Сталь 35ХГСЛ, модифицированная INSTEEL	205	582	32,5
3	Сталь 35ХГСЛ, модифицированная TiC	220	602	29,7

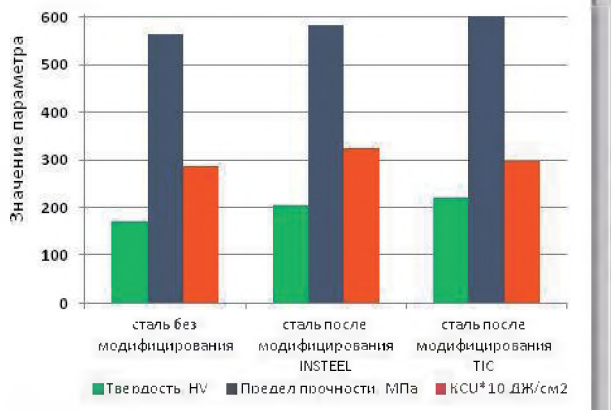


Рис. 2. Сравнительная диаграмма свойств стали до и после модифицирования

проводили при температуре 20°С в соответствии с методикой по ГОСТ 9454-78 на маятниковом копре Zwick/Roell RKP 450 (Zwick/Roell, Германия) с энергией удара маятника 300 Дж. Испытания проводили на трех образцах с определением среднего арифметического для параметров $\sigma_в$ и KCU.

Результаты экспериментальных исследований и их обсуждение

Результаты испытаний на механические свойства приведены в **табл. 2.** Видно, что введение наномодификаторов положительно влияет на исследуемые свойства. Так, после обработки комплексным модификатором INSTEEL наблюдалось увеличение значений твердости на 19%, предела прочности на разрыв на 3%, ударной вязкости на 13,6%. Также, данные параметры возросли на 28; 6,5 и 3,8%, соответственно, после добавления карбида титана.

Следует отметить, что, несмотря на общую положительную тенденцию улучшения прочностных свойств стали после наномодифицирования, вид модификатора по-разному влияет на свойства. Комплексный модификатор значительно улучшает вязкость стали (**табл. 2**, KCU 32,5 Дж/см^2), в то время как введение модификатора TiC оказывает большее влияние на твердость и прочность. Влияние природы наномодификатора на механические свойства исследуемой стали наглядно иллюстрирует диаграмма на **рис. 2**.

Можно предположить, что повышение прочностных свойств обработанных модификатором образцов связано с изменением внутреннего строения металла. С целью проверки этого предположения были выполнены металлографические исследования.

На **рис. 3** приведены структуры стали 35ХГСЛ

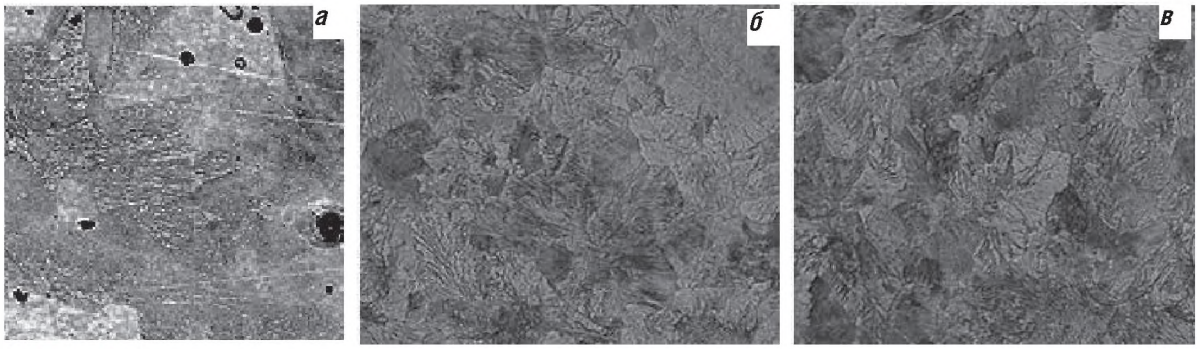


Рис. 3. Структура стали 35ХГСЛ, ×400: ***а*** – без наномодифицирования, ***б*** – модифицированная нанопорошком INSTEEL, ***в*** - модифицированная нанопорошком TiC

в литом состоянии и модифицированной разными модификаторами, после отжига. Как видно из **рис. 3**, структуры стали после наномодифицирования практически идентичны (см. **рис. 3, *б*, *в***): характеризуются достаточно высокой дисперсностью перлита и колониями феррита, а также наличием неметаллических включений. Незначительное расхождение в свойствах стали после наномодифицирования (**табл. 2**), по-видимому, связано именно с близостью структур. Структура исходной стали без наномодифицирования характеризуется более «грубым» перлитом, наличием включений, что, вероятно, и объясняет более низкие показатели прочности и твердости.

Введение модификатора INSTEEL оказало комплексное воздействие. В частности, присутствие в модификаторе таких элементов как Ca и Ba, обладающих полной взаимной растворимостью в жидком состоянии, снижает упругость их паров в стали. Благодаря более медленному испарению элементов увеличивается период взаимодействия кальция с металлом и, как следствие, более эффективно протекает процесс очищения сплава от кислорода и серы, повышается усвоение кальция в металле за счет модифицирования большего числа неметаллических включений (НМВ). Вероятное снижение количества НМВ, уменьшения их размеров и приближение их формы к правильной шаровидной с одновременным их равномерным распределением в объеме металла может быть причиной увеличения значений ударной вязкости [11, 12]. Ввод РЗМ (La) в сталь обеспечивает возможность влиять на процесс кристаллизации отливок. Так, при взаимодействии La с жидким расплавом вначале образуются оксиды, а затем сульфиды, характерным свойством которых является их высокая тугоплавкость. Большинство оксидов РЗМ имеет температуру плавления 2200…2300°С, а сульфидов – 2000…2200°С. Учитывая такую способность, можно считать, что оксиды и сульфиды РЗМ находятся в твердом состоянии и могут являться центрами кристаллизации. С другой стороны, образование тугоплавких и прочных интерметаллидов при вводе РЗМ обеспечивает устранение межкристаллитной низкотемпературной и высокотемпературной хрупкости, что повышает пластические свойства стали. В свою очередь, наличие титана и ниобия в составе модификатора способствует образованию стойких карбидов, что повысило прочностные свойства стали и ее твердость [13]. Таким образом, использование модификаторов позволило улучшить структуру и, как следствие, механические свойства стали без изменения ее химического состава.

Выводы

Введение модификатора в среднелегированную литую сталь 35ХГСЛ в процессе плавки в виде нанопорошка повысило механические свойства стали. Комплексный модификатор INSTEEL оказал большее влияние на ударную вязкость, а использование TiC привело к более эффективному повышению прочности. Микроструктура стали после модифицирования в обоих случаях (**рис. 3, *б, в***) носит схожий и более дисперсный характер, чем в исходной стали без обработки (**рис. 3, *а***) с отсутствием нарушений сплошности металла.

Таким образом, в зависимости от конкретных условий работы литых изделий из конструкционной среднелегированной стали можно рекомендовать определенный состав модификатора с активными элементами, комбинация и количественное содержание которых удовлетворяет требованиям к прочности и вязкости стали.

Данные исследования проведены в рамках реализации гранта Комитета науки МНВО РК BR24993020 «Разработка и внедрение технологии изготовления сложнолегированных сталей с гомогенной структурой за счет синергии воздействий на расплав».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Kovalev P.V., Popova S.D., Issagulov A.Z.** Investigation of the effect of high strength strips steel modification with rare-earth metal

(REM) // Metalurgija. 2017. 56(3-4). P. 393–395.

2. **Ghali S.N., H.S., Eissa M.M.** Influence of boron additions on mechanical properties of carbon El-Faramawy steel // Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering. 2012. Vol. 11. № 10. P. 995–999.

3. **Long D., Sun Y., Zhang R., Qiu S., Yu L.** Effects of Zr Content on the Microstructure of FeCrAl ODS Steels // Metals. 2022. Vol. 12(7). P. 1114.

4. **Hsiung L.L., Fluss, M.J., Tumey S.J., Choi B.W., Serruys Y., Willaime F., Kimura A.** Formation mechanism and the role of nanoparticles in Fe-Cr ODS steels developed for radiation tolerance // Physical Review B: Condensed Matter and Materials Physics. 2010. Vol. 82. P. 184.

5. **Yin G.Q., Kang X., Zhao G.P.** Fatigue Properties of the Ultra-High Strength Steel TM210A // Materials. 2017. Vol. 10. P. 1057.

6. **Jipeng H., Hongmei Z., Jianwen Z., Mengna O., Changjun Q., Ji'an D.** Effects of TiC addition on microstructure, microhardness and wear resistance of 18Ni300 steel by direct laser deposition // Journal of Materials Processing Technology. 2021. Vol. 296. P. 117213.

7. **Duzcukohfu H.** Effect of boron addition on Mechanical properties of 60SiCr7Steel // International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing. 2015. Vol. 3. № 2. P. 32–38.

8. **Xu S., Chen L., Cao S., Jia H.D., Zhou Z.J.** Research Progress on Microstructure Design and Control of ODS Steels Applied to Advanced Nuclear Energy Systems // Materials Reports. 2019. Vol. 33. P. 78–82.

9. **Milovanović V, Arsić D, Milutinović M, Živković M, Topalović M.** A Comparison Study of Fatigue Behavior of S355J2+N, S690QL and X37CrMoV5-1 // Metals. 2022. Vol. 12(7). P. 1199.

10. **Yin G.Q., Kang X., Zhao G.P.** Fatigue Properties of the Ultra-High Strength Steel TM210A // Materials. 2017. Vol. 10. P. 1057.

11. **Голубцов В.А., Дынин А.Я., Рошожина Т.В., Рябчиков И.В., Усманов Р.Г.** Применение продукции компании НПП при модифицировании стали // Литье и металлургия. 2009. № 3 (52). С. 245–253.

12. **Пат. RU 2530190 C1.** Модификатор для стали / Назаратин В.В., Дегтярев А.Ф., Егорова М.А., Новиков В.А., Сверчков С.Н. Опубл: 10.10.2014. Бюл. № 28.

13. **Голубцов В.А., Рябчиков И.В., Бакин И.В., Дынин А.Я., Романов О.Н., Прядко А.А.** Применение микрокристаллических комплексных модификаторов для внепечной обработки стали // Сталеплавильное производство. Бюллетень Черная металлургия. 2021. Т. 77. № 4. С. 418–431.

Сведения об авторах

Скворцов Евгений Викторович – магистр науки и технологий, ст. препод. кафедры «Нанотехнологии и металлургия», НАО Карагандинский Технический Университет имени Абылкаса Сагинова. Республика Казахстан. E-mail: yev-79@mail.ru

Исагулов Аристотель Зейнуллинович – д-р техн. наук, проф., там же. E-mail: aristotel@kstu.kz

Султангазиев Руслан Бауыржанович – доктор PhD, ст. науч. сотр. Химико-металлургический институт имени Ж. Абишева. Лаборатория «Бор». Республика Казахстан, г. Караганда. E-mail: sulrus83@mail.ru

Нарембекова Айтбала – канд. техн. наук, ст. науч. сотр. Химико-металлургический институт имени Ж. Абишева. Лаборатория «Физико-химии и комплексной переработки конденсированных отходов». E-mail: cpk-kru@mail.ru