

К ВОПРОСУ ПОВЫШЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ОТЛИВОК ИЗ ВЫСОКОМАРГАНЦОВИСТОЙ СТАЛИ

*А. В. КАЛЯСКИН, аспирант кафедры пирометаллургических и литейных технологий, 155@nppgroup.ru;
И. В. БАКИН, канд. техн. наук, преподаватель кафедры материаловедения и физико-химии материалов,
igor_bakin@mail.ru; Б. А. КУЛАКОВ, д-р техн. наук, профессор пирометаллургических
и литейных технологий, kulakovba@susu.ru; А. А. АНТИПЬЕВ, магистр кафедры
материаловедения и физико-химии материалов, 157@nppgroup.ru
(Южно-Уральский государственный университет (национальный
исследовательский университет), Россия, г. Челябинск)*

Аннотация. В настоящее время одной из наиболее важных задач при производстве оборудования для горно-обогатительной промышленности является проведение работ по импортозамещению. В связи с этим исследования, направленные на совершенствование технологий получения высококачественных отливок из износостойких марганцовистых аустенитных сталей, представляются актуальными. В статье приведены результаты металлографических исследований образцов высокомарганцовистой стали, полученных на предприятиях, производящих дробящие плиты и конусы дробилок, траки гусеничные, молоты, зубья ковшей экскаваторов, коронки зубьев и т. д. Анализ микроструктуры представленных отливок показал, что для них характерна крупнозернистая структура с размером зерна аустенита 1–2 балла. В большинстве случаев наблюдается утолщенная граница зерен, присутствие по границам зерен карбидов марганца и неметаллических включений. Выявленные особенности микроструктуры отливок являются важными индикаторами, позволяющими прогнозировать низкую стойкость металлоизделий из высокомарганцовистых сталей. Перечислены эксплуатационные и технологические факторы, влияющие на износостойкость отливок. Предложены рекомендации по улучшению качества металлоизделий из марганцовистых сталей, представлены результаты применения в условиях реального производства оригинальных комплексных модификаторов, разработанных в ООО НПП «Технология».

Ключевые слова: высокомарганцовистая сталь, марганцовистая аустенитная сталь, модифицирование, легирование, микроструктура, ударно-абразивный износ, зерно аустенита, граница зерен, карбиды, неметаллические включения.

Ссылка для цитирования: Каляскин А. В., Бакин И. В., Кулаков Б. А., Антипьев А. А. К вопросу повышения износостойкости отливок из высокомарганцовистой стали // Черная металлургия. Бюллетень научнотехнической и экономической информации. 2023. Т. 79. № 11. С. 893-900.

DOI: 10.32339/0135-5910-2023-11-893-900

TO THE QUESTION OF IMPROVING THE WEAR RESISTANCE OF HIGH MANGANESE STEEL CASTINGS

*A. V. KALYASKIN, Postgraduate Student of the Department of Pyrometallurgical and Foundry Technologies,
155@nppgroup.ru, I. V. BAKIN, PhD (Tech.), Lecturer at the Department of Materials Science and Physical
Chemistry of Materials, igor.npp.bakin@gmail.com; B. A. KULAKOV, HD (Tech.), Professor of the Department
of Pyrometallurgical and Foundry Technologies, kulakovba@susu.ru; A. A. ANTIP'EV, Master's Student,
of the Department of Materials Science and Physical Chemistry of Materials, 157@nppgroup.ru
(South Ural State University (National Research University), Russia, Chelyabinsk)*

Abstract. Nowadays, one of the most significant tasks in production of equipment for mining industry is import substitution. In this regard, investigations aimed at improving the technologies of manufacturing high quality castings from wear resistance manganese austenitic steels seems to be relevant. The results of metallographic research of high manganese steel samples from foundries producing crushing plates and crushing cones, track links, hammers, shovel teeth, tooth caps etc. are given. Analysis of the microstructure of the presented castings showed that they are characterized by a coarse-grained structure with an austenite grain size of 1–2 points. In most cases, a thickened grain boundary, presence of manganese carbides along the grain boundaries and non-metallic inclusions are observed. The revealed microstructure features of castings are one of the main indicators of low wear resistance of high manganese steel parts.

The operational and technological factors affecting the wear resistance of castings are listed. Recommendations for improving the quality of steel products made from manganese steels are proposed, and the results of using original complex modifiers developed at NPP Technology Company in real manufacturing conditions are presented.

Keywords: high manganese steel, austenitic manganese steel, inoculation, alloying, microstructure, impact and abrasive wear, grain of austenite, grain boundary, carbides, non-metallic inclusions.

For citation: Kalyaskin A. V., Bakin I. V., Kulakov B. A., Antip'ev A. A. To the question of improving the wear resistance of high manganese steel castings. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoi i ekonomicheskoi informatsii = Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 2023, vol. 79, no. 11, pp. 893-900. (In Russ.).

DOI: 10.32339/0135-5910-2023-11-893-900

Обзор проблемы

Высокомарганцовистые стали востребованы во всем мире и имеют широкое применение в машиностроительной, горнодобывающей и железнодорожной промышленности. Из них изготавливают дробящие плиты, щеки и конусы дробилок, корпуса вихревых и шаровых мельниц, зубья и стенки ковшей экскаваторов, железнодорожные крестовины, стрелочные переводы и другие детали, работающие в условиях абразивного, ударного, ударно-абразивного износа или динамической нагрузки.

На данный момент изделия из марганцовистой аустенитной стали отечественного производства в среднем менее качественны по сравнению с импортными аналогами. Под качеством изделий понимается длительность их эксплуатации, обусловленная стойкостью к динамическому, ударному или ударно-абразивному изнашиванию.

Для изготовления вышеперечисленных деталей российские производители чаще всего используют сталь 110Г13Л традиционного состава по ГОСТ 977–88 (0,9–1,4 % С; 11,5–15,0 % Mn; <1 % Cr; <1 % Ni), но она имеет ограниченные возможности для повышения эксплуатационных характеристик металла методами легирования и микролегирования. В то же время на рынке представлены образцы иностранной продукции с различными соотношениями марганца и углерода. Например, для изделий, работающих в условиях высокого ударно-абразивного износа (для изготовления дробящих плит и конусов дробления), рекомендуется использовать сталь с соотношением Mn/C \approx 21,0 (С \approx 1 %, Mn \approx 21 %), в условиях менее интенсивного ударно-абразивного износа — сталь с соотношением Mn/C \approx 13,0 (С \approx 1,3 %; Mn \approx 17 %) [1, 2]. Иностранными компаниями также поставляются отливки, изготовленные из стали, легированной титаном, хромом, молибденем, ванадием, азотом и другими элемента-

ми в зависимости от вида нагрузки, воспринимаемой конечным изделием [3, 4].

Повышение качества стали в реальных условиях может быть связано с рядом организационных и технологических трудностей. Во-первых, выплавка стали в дуговой печи с основной футеровкой подразумевает работу со шлаками (наведение, раскисление, скачивание), что заметно удлиняет технологический процесс, увеличивает трудозатраты и расходы на электроэнергию, а также на материалы для работы со шлаками (шлакообразующие, раскисляющие смеси, флюсы и пр.). Во-вторых, возникает необходимость использования дорогостоящих модификаторов и легирующих компонентов (Ti, V, Mo, Cr и др.), что может существенно повлиять на себестоимость продукции. В-третьих, требуется проведение оптимальной термической обработки.

В настоящее время актуальной задачей является проведение работ по импортозамещению. Потребители износостойких изделий активно занимаются поиском альтернативных производителей качественных отливок из высокомарганцовистых сталей на российском рынке. Сегодняшний покупатель готов платить за отливки, обеспечивающие целевые служебные свойства. В связи с этим перед металлургами стоят актуальные задачи по оптимизации химического состава отливки в зависимости от условий ее эксплуатации (от типа нагрузки: динамической, ударной, ударно-абразивной), а также по совершенствованию технологических мероприятий, таких как:

– подбор материалов и методов эффективного раскисления шлака [5, 6];

– разработка рациональных составов модификаторов, лигатур и технологии их применения, обеспечивающих качественное рафинирование металла от неметаллических включений, измельчение зерна аустенита, снижение формирования карбидных, оксидных и окиссуль-

фидных фаз по границам аустенитного зерна [7–9];

– совершенствование режимов термической обработки [10–13].

Одно из важнейших свойств изделий из высокомарганцовистых сталей — износостойкость. На уровень износостойкости существенное влияние могут оказывать следующие факторы:

– свойства измельчаемого материала, т. е. его размеры, твердость, объемы переработки;

– химический состав стали, содержание марганца и его соотношение с углеродом, использование легирующих и микролегирующих элементов [14];

– величина зерна, чистота границ зерен, уровень загрязненности по неметаллическим включениям (оксиды, сульфиды, нитриды и пр.), наличие дефектов отливок и др. [15].

Указанные факторы необходимо учитывать при производстве отливок с требуемой износостойкостью.

Материалы и методика исследования

В настоящей работе проведен анализ качества отливок из стали 110Г13Л, получаемых на ряде отечественных предприятий. Исследовали образцы литого металла нескольких предпри-

ятий, выплавляющих сталь в дуговых печах с основной футеровкой методом переплава. Проанализирована технология их производства, исследован химический состав металла и шлака, проведено металлографическое исследование характерных образцов металла.

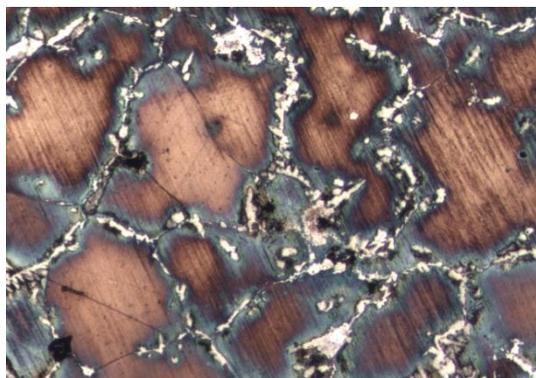
Химический анализ исследуемых образцов металла проводили в производственной лаборатории спектрометром Q4 TASMАN, а также оптическим эмиссионным спектрометром ДФС-500.

Металлографическое исследование выполнили в лаборатории ООО НПП «Технология» (г. Челябинск) с помощью оптического электронного микроскопа SIAMS MT-300.

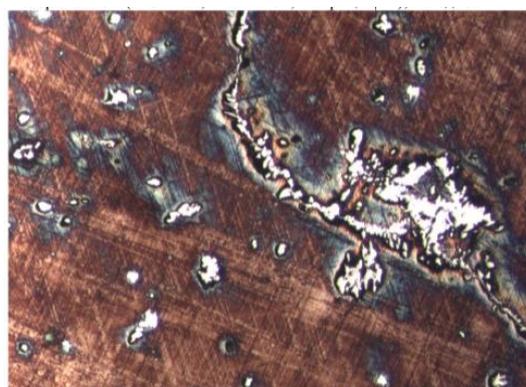
Результаты исследования и их обсуждение

Химический состав анализируемых образцов стальных отливок представлен в основном классическим составом высокомарганцовистой стали 110Г13Л (ГОСТ 977–98) с содержанием углерода 1–1,3 % и марганца 12–14 %. Отношение Mn/C на одних предприятиях составляет 9,5–10,5, на других — 12.

На рис. 1 представлены результаты металлографического исследования образцов стали 110Г13Л отливки «зуб ковша» до проведения термической обработки.



а



б

Рис. 1. Микроструктура образца отливки «зуб ковша» до проведения термической обработки:
а — $\times 50$; б — $\times 100$

Fig. 1. Microstructure of the “bucket tooth” casting sample before heat treatment:
а — $\times 50$; б — $\times 100$

На изображениях микроструктуры (см. рис. 1) видно, что в структуре металла наблюдаются скопления по границам зерен избыточных карбидов $(Fe, Mn)_3C$, снижающих прочность и вязкость стали, а также неметаллические включения как по границам зерен, так и в теле аустенитного зерна. Балл зерна определен как 1–2 (крупнозер-

нистая структура). Наличие неметаллических включений объясняется отсутствием технологических мероприятий по рафинированию металла (наведение, раскисление, скачивание шлака, обработка металла рафинирующими материалами и т. д.).

На рис. 2 представлены результаты металлографического исследования образцов отливки

«зуб ковша» после термической обработки (закалки).

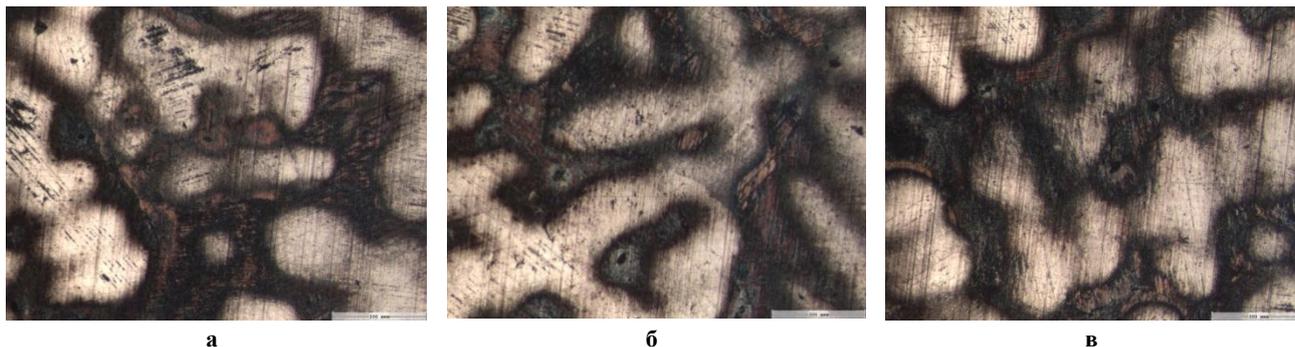


Рис. 2. Микроструктура образцов стали для заливки зубьев ковша экскаватора после термической обработки, $\times 100$

Fig. 2. Microstructure of steel samples after heat treatment for “bucket tooth” production, $\times 100$

Полученная микроструктура стали, представленная на рис. 2, является браковочной, поскольку в результате термообработки получена структура с большим количеством мартенсита (темные участки — мартенсит, светлые — аустенит), содержание которого не допускается. Присутствие мартенсита в структуре обу-

словлено низкой скоростью охлаждения в процессе закалки и будет приводить к трещинообразованию при эксплуатации изделий [16, 17].

На рис. 3 представлены результаты металлографического исследования образцов стали 110Г13Л отливки «трак гусеничный» после проведения термической обработки.

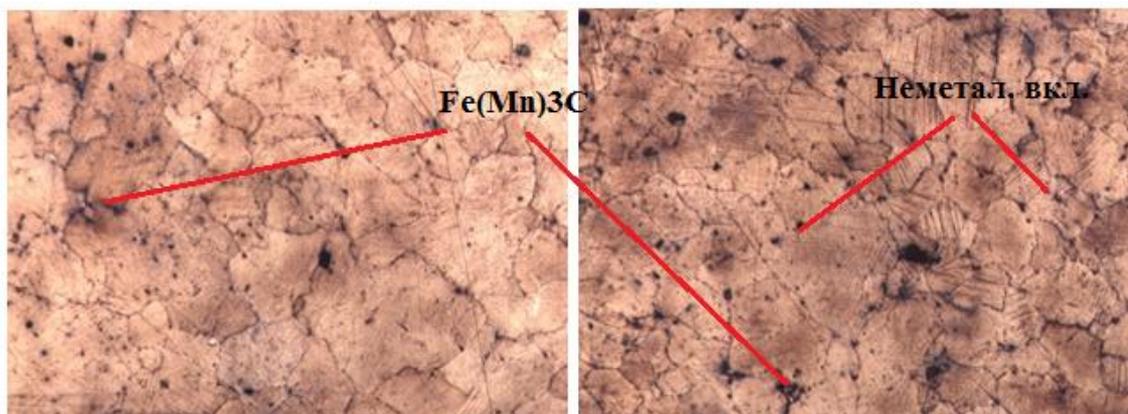


Рис. 3. Микроструктура образца отливки «трак гусеничный» после термической обработки, $\times 50$

Fig. 3. Microstructure of “truck link” casting sample after heat treatment, $\times 50$

В микроструктуре образцов стали наблюдается утолщенная граница зерен, скопления карбидов, неметаллические включения как по границам зерен, так и в зерне аустенита, структура крупнозернистая. Наличие карбидов предполагает, что режим термообработки, применяемый на предприятии, должен быть доработан, для того чтобы обеспечить растворение карбидов в аустенитном зерне.

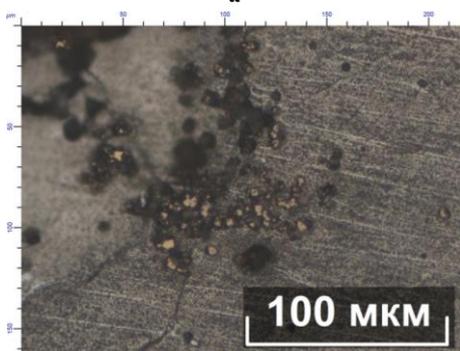
Анализ шлака показал, что содержание FeO на данном предприятии колебалось в пределах 4–6 %, содержание MnO — 17–27 %. Столь высокое

содержание MnO свидетельствует о высокой окисленности шлака, что приводит к высокой активности кислорода в металле и низкому усвоению марганца в ходе выплавки стали (менее 80 %).

Излишнее содержание активного кислорода в металле вызывает появление дефектов на поверхности отливок в виде мелкой ситовидной пористости (рис. 4, а), скопление неметаллических включений (оксиды алюминия и марганца) в микроструктуре отливок (см. рис. 4, б), снижение усвоения активных элементов при микролегировании металла.



а



б

Рис. 4. Дефекты поверхности отливки (а) и скопление неметаллических включений в микроструктуре стали (б)

Fig. 4. Casting surface defects (a) and accumulation of non-metallic inclusions in steel microstructure (b)

Одним из эффективных методов раскисления шлака (снижения содержания закиси железа и марганца в шлаке и повышения основности шлака) при выплавке высокомарганцевистой стали в дуговой печи является применение обожженной извести в сочетании со стружкой алюминия. Данный метод хорошо зарекомендовал себя на практике и позволяет снижать суммарное содержание FeO и MnO в шлаке с 20–25 до 5–6 %, получать на выходе серобелый рассыпающийся шлак (рис. 5), свидетельствующий о высокой основности.

После рафинирования металла в печи важным этапом повышения износостойкости стали является внепечная обработка. В условиях литейного предприятия обработку стали чаще всего осуществляют в ковше во время слива металла из печи. Целью рафинирования, модифицирования и микролегирования металла является снижение количества неметаллических включений, измельчение зерна аустенита, упрочнение металлической матрицы карбидами, карбонитридами, снижение количества карбидов, особенно сульфидов марганца по границам зерен. В компании ООО НПП «Технология» разработан комплексный модификатор, позволяющий решать



а



б

Рис. 5. Нераסקисленный (а) и раскисленный шлак (б)

Fig. 5. Nondeoxidized slag (a) and deoxidized slag (b)

вышеперечисленные задачи. В состав комплексного модификатора INSTEEL®7 входят такие активные элементы, как кальций, барий, титан и редкоземельные металлы (La, Ce).

Модификатор INSTEEL®7 в процессе обработки оказывает комплексное воздействие на расплав стали, а именно кальций и барий рафинируют сталь от неметаллических включений, редкоземельные металлы нейтрализуют влияние серы и предотвращают выделение сульфидов по границам зерна, титан позволяет дополнительно измельчить зерно и способствует дисперсному упрочнению матрицы за счет образования наноразмерных карбонитридов.

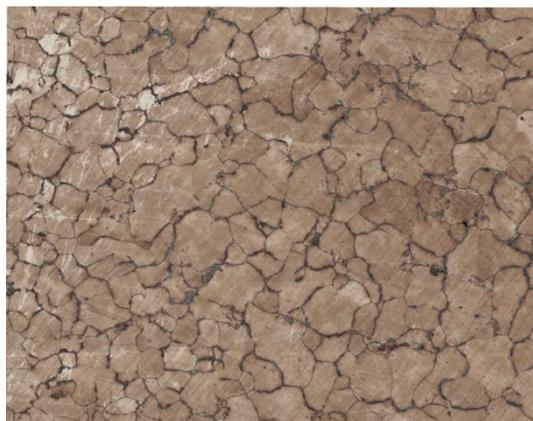
На предприятии, производящем дробящие плиты и конусы дробилок, проведена обработка стали модификатором INSTEEL®7 в ковше. Сталь выплавляли в дуговой печи ДСП-5 с основной футеровкой методом переплава с содержанием отходов марганцевистой стали 80–100 %. Химический состав стали до и после обработки модификатором представлен в таблице.

Результаты металлографического исследования немодифицированной и модифицированной стали в литом состоянии представлены на рис. 6.

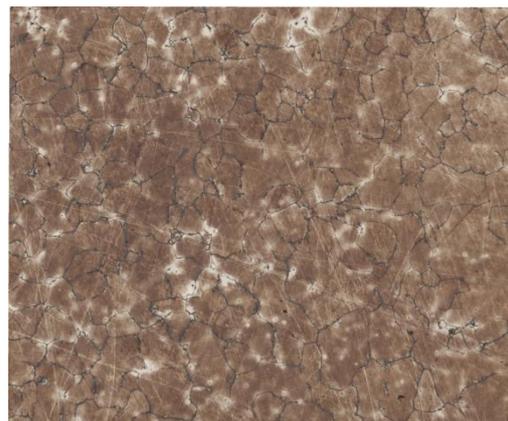
ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ СТАЛИ

CHEMICAL COMPOSITION OF STEEL

Наименование	Содержание, %								
	C	Si	Mn	Cr	P	S	Al	Ti	Mn/C
По расплавлению	1,14	0,23	9,43	0,45	0,068	0,003	—	—	8,3
После доводки по марганцу	1,12	0,23	13,02	0,45	0,071	0,002	0,02	—	11,6
После модифицирования	1,22	0,35	12,32	0,45	0,076	0,003	0,05	0,033	10,1



а



б

Рис. 6. Микроструктура образцов стали, обработанной модификатором INSTEEL®7, ×50:
а — немодифицированная сталь; б — модифицированная сталь

Fig. 6. Microstructure of samples of steel treated with modifier INSTEEL®7, ×50:
а — unmodified steel; б — modified steel

В результате сравнения микроструктуры образцов стали в литом состоянии, представленной на рис. 6, видно, что модифицирование позволило существенно очистить границы зерен аустенита, а также измельчить его зерна с 1–2 до 3–4 баллов, это повысило срок эксплуатации конусов дробления на 30 % на предприятии, измельчающем шлак ферромарганца.

Выводы

Таким образом, для производства отливок из высокомарганцевистой стали с высокими эксплуатационными характеристиками необходимо обратить внимание на следующие технологические операции.

1. При выплавке стали (особенно методом переплава) необходимо проводить работу со шлаками в печи, направленную на снижение

содержания оксидов железа и марганца, повышение основности шлака. Это позволяет повысить усвоение марганца, эффективность модифицирования и микролегирования, снизить загрязненность металла неметаллическими включениями и в конечном итоге повысить эксплуатационные свойства металлоизделий.

2. Проводить внепечную обработку стали комплексными модификаторами с целью рафинирования и микролегирования металла, модифицирования ее структуры для измельчения аустенитного зерна, а также очистки границ зерен от карбидных и, особенно, сульфидных и оксисульфидных фаз.

3. Осваивать производство отливок с высоким (более 17 %) содержанием марганца, определить параметры их термической обработки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Gurol U., Can Kurnaz S. Effect of carbon and manganese content on the microstructure and mechanical properties of high manganese austenitic steel // *Journal of Mining and Metallurgy, Section B: Metallurgy*. 2020. V. 56. № 2. P. 171–182. DOI: 10.2298/JMMB191111009G.
2. Lencina R., Caletti C., Brunelli K., Micone R. Assessing Wear Performance of Two High-carbon Hadfield Steels Through Field Tests in the Mining Industry // *Procedia Materials Science*. 2015. V. 9. P. 358–366. DOI: 10.1016/j.mspro.2015.05.005.
3. Tęcza G., Garbacz-Klempka A. Microstructure of Cast High-Manganese Steel Containing Titanium // *Archives of Foundry Engineering*. 2016. V. 16. № 4. P. 163–168. DOI: 10.1515/afe-2016-0103.
4. Pham M. K., Nguyen D. N., Hoang A. T. Influence of vanadium content on the microstructure and mechanical properties of high-manganese steel // *International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering. IJME-IJENS*. 2018. V. 18. № 2. P. 141–147.
5. Вдовин К. Н., Феоктистов Н. А., Сеницкий Е. В. и др. Выплавка высокомарганцевистой стали в дуговой сталеплавильной печи. Технология. Сообщение 1 // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2015. Т. 58. № 10. С. 735–739. DOI: 10.17073/0368-0797-2015-10-735-739.
6. Stenholm K., Andersson N., Tilliander A., Jönsson P. The role of process control on the steel cleanliness // *Ironmaking & Steelmaking*. 2018. V. 45. Iss. 2. P. 114–124. DOI: 10.1080/03019233.2016.1245917.
7. Вдовин К. Н., Феоктистов Н. А., Горленко Д. А. и др. Модифицирование отливок из высокомарганцевистой стали карбонитридом титана // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2019. Т. 62. № 3. С. 188–194. DOI: 10.17073/0368-0797-2019-3-188-194.
8. Arvola D. A., Lekakh S. N., O'Malley R. J., Bartlett L. N. Two Inoculation Methods for Refining As-Cast Grain Structure in Austenitic 316L Steel // *International Journal of Metalcasting*. 2019. V. 13. P. 504–518. DOI: 10.1007/s40962-018-0260-1.
9. Сысоев А. М., Бахметьев В. В., Колокольцев В. М. Рафинирование и модифицирование стали 110Г13Л комплексом титан-бор-кальций // *Вестник МГТУ им. Г. И. Носова*. 2008. № 1. С. 43–45.
10. Габельченко Н. И., Мишустин О. А., Хантимирова С. Б. Повышение качества отливок из стали 110Г13Л путем оптимизации режима термической обработки // *Техника. Технология. Инженерия*. 2018. № 1 (7). С. 21–23.
11. Вдовин К. Н., Феоктистов Н. А., Горленко Д. А. и др. Исследование влияния легирования и термической обработки на абразивную и ударно-абразивную износостойкость высокомарганцевистой стали // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2017. Т. 60. № 11. С. 904–909. DOI: 10.17073/0368-0797-2017-11-904-909.
12. Адаменко Л. А., Иванова Л. Х. Термическая обработка отливок броней конусных дробилок // *Литье. Металлургия*. 2013: материалы IX Международной научно-практической конференции (21–24 мая 2013 г., г. Запорожье) / Под общ. ред. О. И. Пономаренко. — Запорожье: ЗТПП, 2013. С. 11, 12.
13. Лозоватская К. А., Еремина К. П., Жавнеров А. Н. Исследование влияния режимов термической обработки на структуру и механические свойства стали с высоким содержанием марганца 110Г13Л // *Техника и технологии машиностроения: материалы V Международной студенческой научно-практической конференции (Омск, 4–10 апреля 2016 г.)*. — Омск: Омский государственный технический университет, 2016. С. 193–196.
14. Давыдов Н. Г. Высокомарганцевистая сталь. — М.: Металлургия, 1979. — 175 с.
15. Вдовин К. Н., Феоктистов Н. А., Горленко Д. А. и др. Исследование влияния комплексного легирования высокомарганцевистой стали, азотированной Ti-Si лигатурой, на показатели абразивной износостойкости // *Теория и технология металлургического производства*. 2016. Т. 19. № 2. С. 58–64.
16. Гильманшина Т. Р., Крицкий Д. Ю., Тюрин С. И. и др. Исследование возможности повышения надежности литых крупногабаритных изделий для горного оборудования // *Интернет-журнал «Науковедение»*. 2017. Т. 9. № 2. URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/96TVN217.pdf>.
17. Франценюк И. В., Франценюк Л. И. Альбом микроструктур чугуна, стали, цветных металлов и их сплавов. — М.: Академкнига, 2004. — 192 с.

Поступила 5 октября 2023 г.

REFERENCES

1. Gurol U., Can Kurnaz S. Effect of carbon and manganese content on the microstructure and mechanical properties of high manganese austenitic steel. *Journal of Mining and Metallurgy, Section B: Metallurgy*, 2020, vol. 56, no. 2, pp. 171–182. DOI: 10.2298/JMMB191111009G.
2. Lencina R., Caletti C., Brunelli K., Micone R. Assessing Wear Performance of Two High-carbon Hadfield Steels Through Field Tests in the Mining Industry. *Procedia Materials Science*, 2015, vol. 9, pp. 358–366. DOI: 10.1016/j.mspro.2015.05.005.
3. Tęcza G., Garbacz-Klempka A. Microstructure of Cast High-Manganese Steel Containing Titanium. *Archives of Foundry Engineering*, 2016, vol. 16, no. 4, pp. 163–168. DOI: 10.1515/afe-2016-0103.
4. Pham M. K., Nguyen D. N., Hoang A. T. Influence of vanadium content on the microstructure and mechanical properties of high-manganese steel. *International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering. IJMME-IJENS*, vol. 18, no. 2, pp. 141–147.
5. Vdovin K. N., Feoktistov N. A., Sinitskii E. V. etc. High-manganese steel smelting in electric arc furnace. Technology. Report 1. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya*, 2015, vol. 58, no. 10, pp. 735–739. (In Russ.). DOI: 10.17073/0368-0797-2015-10-735-739.
6. Stenholm K., Andersson N., Tilliander A., Jönsson P. The role of process control on the steel cleanliness. *Ironmaking & Steelmaking*, 2018, vol. 45, iss. 2, pp. 114–124. DOI: 10.1080/03019233.2016.1245917.
7. Vdovin K. N., Feoktistov N. A., Gorlenko D. A. etc. Inoculation of high manganese steel castings using titanium carbonitride. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya*, 2019, vol. 62, no. 3, pp. 188–194. (In Russ.). DOI: 10.17073/0368-0797-2019-3-188-194.
8. Arvola D. A., Lekakh S. N., O'Malley R. J., Bartlett L. N. Two Inoculation Methods for Refining As-Cast Grain Structure in Austenitic 316L Steel. *International Journal of Metalcasting*, 2019, vol. 13, pp. 504–518. DOI: 10.1007/s40962-018-0260-1.
9. Sysoev A. M., Bachmet'ev V. V., Kolokol'tsev V. M. Refining and modifying of steel 110G13L with complex titanium-boron-calcium. *Vestnik MGTU im. G. I. Nosova*, 2008, no. 1, pp. 43–45. (In Russ.).
10. Gabel'chenko N. I., Mishustin O. A., Khantimirova S. B. Increasing of quality of castings from steel 110G13L with optimization of thermal treatment mode. *Technika. Tekhnologiya. Ingeneriya*, 2018, no. 1 (7), pp. 21–23. (In Russ.).
11. Vdovin K. N., Feoktistov N. A., Gorlenko D. A. etc. Influence of alloying and thermal treatment on abrasive and impactabrasive wear resistance of castings produced from high-manganese steel. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya*, 2017, vol. 60, no. 11, pp. 904–909. (In Russ.). DOI: 10.17073/0368-0797-2017-11-904-909.
12. Adamenko L. A., Ivanova L. Ch. *Termicheskaya obrabotka otlivok bronei konusnykh drobilok* [Thermal treatment of mantle castings]. *Lit'e. Metallurgiya. 2013: materialy IX Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii (21–24 maya 2013 g., g. Zaporozh'e)* [Litye. Metallurgiya 2013: Materials IX International science-practical conference (21–24 May 2013, Zaporozhye)]. Zaporozh'e: ZTPP, 2013, pp. 11–12. (In Russ.).
13. Lozovatskaya K. A., Eremina K. P., Zhavnerov A. N. *Issledovanie vliyaniya rezhimov termicheskoi obrabotki na strukturu i mekhanicheskie svoystva stali s vysokim sodержaniem margantsa 110G13L* [Investigation of impact of heat treatment modes on microstructure and mechanical properties of steel with high manganese content 110G13L]. *Tekhnika i tekhnologii mashinostroeniya: materialy V Mezhdunarodnoi studencheskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii (Omsk, 4–10 aprelya 2016 g.)* [Machinery and technologies of mechanical engineering: materials V International student science-practical conference (Omsk, 4–10 April 2016)]. Omsk: Omskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2016, pp. 193–196. (In Russ.).
14. Davydov N. G. *Vysokomargantsovistaya stal'* [High manganese steel]. Moscow: Metallurgiya, 1979, 175 p. (In Russ.).
15. Vdovin K. N., Feoktistov N. A., Gorlenko D. A. etc. Study the influence of complex alloying of high manganese steel with nitrided Ti-Ca ligature on abrasive wear resistance features. *Teoria i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*, 2016, vol. 19, no. 2, pp. 58–64. (In Russ.).
16. Gilmanshina T. R., Kritsky D. U., Tyurin S. I. etc. Possibility of increasing the reliability of large-sized molded products for the mining equipment. *Internet-magazine "Naukovedenie"*, 2017, vol. 9, no. 2. URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/96TVN217.pdf>. (In Russ.).
17. Frantsenyuk I. V., Frantsenyuk L. I. *Al'bom mikrostruktur chuguna, stali, tsvetnykh metallov i ikh splavov* [Microstructure album of cast iron, steel, non-ferrous metals and its alloys]. Moscow: Akademkniga, 2004, 192 p. (In Russ.).

Received October 5, 2023