

УДК 669.187.25:669.15'74-194

## ВЫПЛАВКА ВЫСОКОМАРГАНЦОВИСТОЙ СТАЛИ В ДУГОВОЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ. ВНЕПЕЧНАЯ ОБРАБОТКА. СООБЩЕНИЕ 2<sup>\*,\*\*</sup>

**Вдовин К.Н.<sup>1</sup>**, д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Литейное производство  
и материаловедение» (kn.vdovin@gmail.com)

**Феокистов Н.А.<sup>1</sup>**, к.т.н., старший преподаватель кафедры «Литейное производство  
и материаловедение» (fna87@mail.ru)

**Сеницкий Е.В.<sup>1</sup>**, к.т.н., доцент кафедры «Литейное производство и материаловедение»

**Горленко Д.А.<sup>1</sup>**, ассистент кафедры «Литейное производство  
и материаловедение» (gorldima@yandex.ru)

**Дуров Н.А.<sup>2</sup>**, к.т.н., старший преподаватель кафедры «Экстракция и рециклинг черных металлов»

<sup>1</sup> Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова  
(455000, Россия, Магнитогорск, пр. Ленина, 38)

<sup>2</sup> Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»  
(119049, Россия, Москва, Ленинский пр., 4)

**Аннотация.** Приведены результаты металлографических исследований марганцовистой стали до и после проведения внепечной обработки, а именно: обработки кальций-стронциевым карбонатом, продувки аргоном в ковше и при их совместном проведении. Представлены результаты количественного анализа неметаллических включений, а также изучено расположение неметаллических включений относительно границы зерен. При помощи электронного микроскопа подробно изучены состав и форма включений, образующихся в процессе проведения внепечной обработки и без нее. Описан механизм образования глобулярной формы включений в стали в процессе кристаллизации металла и при внепечной обработке. Рассмотрено влияние различных видов внепечной обработки на показатели ударной вязкости марганцовистой стали. Рассмотрен процесс легирования марганцовистой стали ванадием. Представлены практические данные по влиянию легирования ванадием марганцовистой стали на уровень ударной вязкости.

**Ключевые слова:** внепечная обработка, неметаллические включения, ударная вязкость, объемная доля, легирование ванадием, кальций-стронциевый карбонат, продувка аргоном.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-1-23-28

Раскисление марганцовистой стали в литейном цехе производят вторичным алюминием, остаточное содержание которого в основном находится в интервале от 0,04 до 0,07 %.

Из литературных источников установлено, что введение алюминия в сталь в качестве раскислителя может изменять форму, размер и состав комплексных оксидов. Кроме того, изменяя концентрацию кислорода в металле, алюминий способен оказывать влияние на морфологию сульфидов и их расположение [1 – 4].

Как известно, неметаллические включения в итоге оказывают влияние на механические свойства стали. Для того, чтобы нивелировать их негативное действие, проводят внепечную обработку марганцовистой стали в ковше. Внепечная обработка включает модифицирование кальцийсодержащими материалами, а также продувку инертным газом – аргоном.

Основной задачей проводимых исследований является совершенствование технологии внепечной обработки стали 110Г13Л с целью модифицирования и удаления неметаллических включений.

Для анализа неметаллических включений в марганцовистой стали были отобраны пробы металла от приливных проб отливок.

Первая группа образцов для исследований отобрана от плавок без внепечной обработки. Вторая группа – от плавок с обработкой кальций-стронциевым карбонатом (КСК) в ковше, а третья группа образцов – от плавок после продувки аргоном в ковше. Четвертая группа – после обработки КСК и продувки инертным газом в ковше.

Усредненные количественные характеристики обнаруженных включений представлены в таблице.

Анализируя данные, представленные в таблице, можно сделать вывод, что любой из видов внепечной обработки способствует снижению количества неметаллических включений в стали. Комплексная внепечная

\* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №15-19-10020).

\*\* В работе принимали участие Нефедьев А.А., Метелкин А.А.

**Количественные характеристики неметаллических включений**

**Quantitative characteristics of non-metallic inclusions**

Внепечная обработка	Объемная доля НВ, %	Число НВ, 1/мм <sup>2</sup>	Средняя площадь НВ, мкм <sup>2</sup>	Средняя длина НВ, мкм	Среднее расстояние между НВ, мкм
–	0,87	531	24,8	3,53	128
КСК, 1,5 кг/т	0,68	221	33	6,04	182
Продувка аргоном	0,55	205	16,4	3,88	202
КСК + продувка аргоном, 0,3 м <sup>3</sup> /т	0,45	186	12,3	1,32	221

обработка – модифицирование карбонатом совместно с продувкой инертным газом способствует снижению неметаллических включений почти в два раза.

В процессе обработки стали КСК происходит модифицирование неметаллических включений и их всплытие на зеркало металла в ковше за счет разности плотностей включений и самого металла. Следует отметить, что в результате реакции кальция с кислородом и серой происходит образование дополнительного количества неметаллических включений. В связи с этим, общее количество включений после обработки расплава карбонатом снижается незначительно.

В процессе продувки металла аргоном через донную пробку образуются пузырьки аргона, которые, поднимаясь вверх в объеме расплава, увлекают за собой неметаллические включения.

При комплексной обработке расплава в ковше происходит одновременное модифицирование включений с последующей флотацией их пузырьками аргона на зеркало металла.

Для более подробного изучения морфологии неметаллических включений проведен металлографический анализ на электронном микроскопе. Установлено, что часть включений располагается в межзеренных пространствах (рис. 1), выступает концентраторами напряжений и может привести к интеркристаллитному излому. Остальные включения располагаются внутри зерен (см. рис. 1), повышая вероятность транскристаллитного излома.

Из литературных источников [5, 6] установлено, что на механические свойства металла влияет не только количество неметаллических включений в стали, но и их морфология (состав, форма).

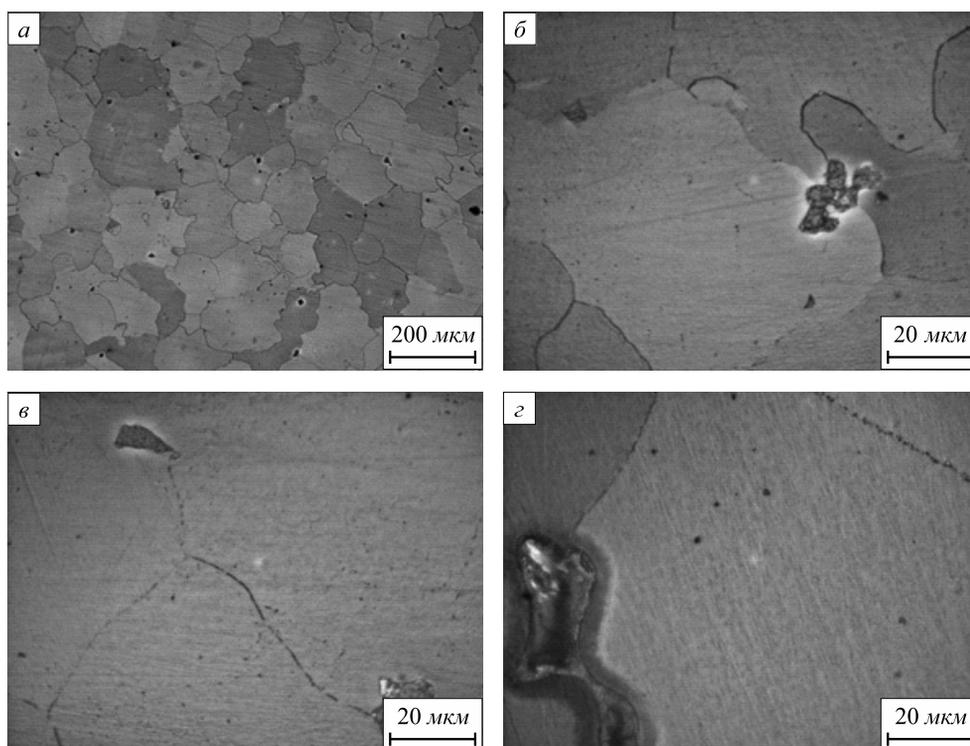


Рис. 1. Расположение неметаллических включений относительно зерен:  
а – ×100; б – г – ×1000

Fig. 1. Location of non-metallic inclusions relative to grains:  
а – ×100; б – г – ×1000

В образцах металла без проведения внепечной обработки наиболее часто встречаются включения прямоугольной (ромбической) формы (рис. 2). В основном это включения алюмосиликатов и силикатов железа. Размер таких включений довольно большой – 5 – 10 мкм.

Округлая форма включений является наиболее благоприятной с точки зрения концентрации напряжений в межзеренных и внутризеренных областях [6, 7]. Такую форму имеют комплексные включения силикатов железа и сульфиды марганца (рис. 2, б), что подтверждается данными, имеющимися в литературе [8, 9].

Правильная глобулярная форма говорит о том, что они находятся в жидком виде при температуре выплавки стали [10, 11]. Эти включения имеют разный механизм образования. В одном случае образуются легкоплавкие эвтектики, получающиеся в результате протекания химических реакций между включением и модификатором, поступившим в металл при внепечной обработке. В другом – включения выделяются из расплава в начальной стадии кристаллизации из-за низкой растворимости, например сульфиды, растворимость которых зависит от содержания свободного кислорода в металле.

После продувки металла аргоном наблюдается снижение количества неметаллических включений, а их форма и размер почти не изменяются.

Совершенно другая картина наблюдается при обработке металла в ковше КСК. В результате поступления в расплав кальция он, в первую очередь, взаимодействует с серой и кислородом с образованием оксисульфидов [12, 13]. Модифицирование оксидов будет возмож-

но в том случае, если поступающий в расплав кальций будет взаимодействовать с оксидом алюминия, образуя при этом жидкие неметаллические включения [14]. Для этого необходимо, чтобы концентрация серы в расплаве находилась в равновесном состоянии с образующимися включениями. По мнению авторов работы [7], содержание серы в металле должно быть не выше 0,015 – 0,020 %. Новая технология выплавки марганцовистой стали в литейном цехе позволяет получить существенно более низкую концентрацию серы в стали.

Для оценки воздействия неметаллических включений был проведен их анализ на сканирующем электронном микроскопе. Фотографии включений представлены на рис. 3.

Как видно, наиболее часто встречаются комплексные включения оксидов марганца и алюминия, оксисульфиды, корунд. Наличие последнего в чистом виде свидетельствует о недостаточном количестве вводимого кальция. Кроме того, встречаются включения алюминатов кальция округлой формы.

После обработки жидкого расплава марганцовистой стали КСК, а также продувки аргоном, происходит увеличение ударной вязкости металла на 5 – 17 %. На гистограмме, представленной на рис. 4, показаны средние величины ударной вязкости до и после проведения внепечной обработки марганцовистой стали.

Легирование стали 110Г13Л осуществлено в печи перед выпуском металла в ковш после проведения восстановительного периода.

Учитывая опыт производственных предприятий по производству отливок из марганцовистой стали, в

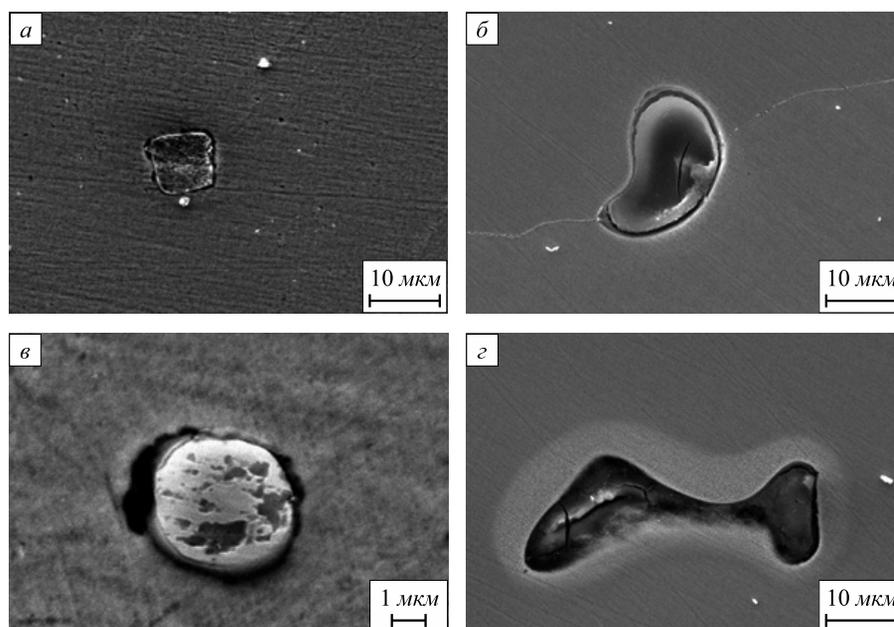


Рис. 2. Включения в стали марки 110Г13Л различной формы: а – ромбическая; б – округлая; в – глобулярная; з – сложная

Fig. 2. Inclusions of different forms in 110G13L steel: а – rhombic; б – round; в – globular; з – complex

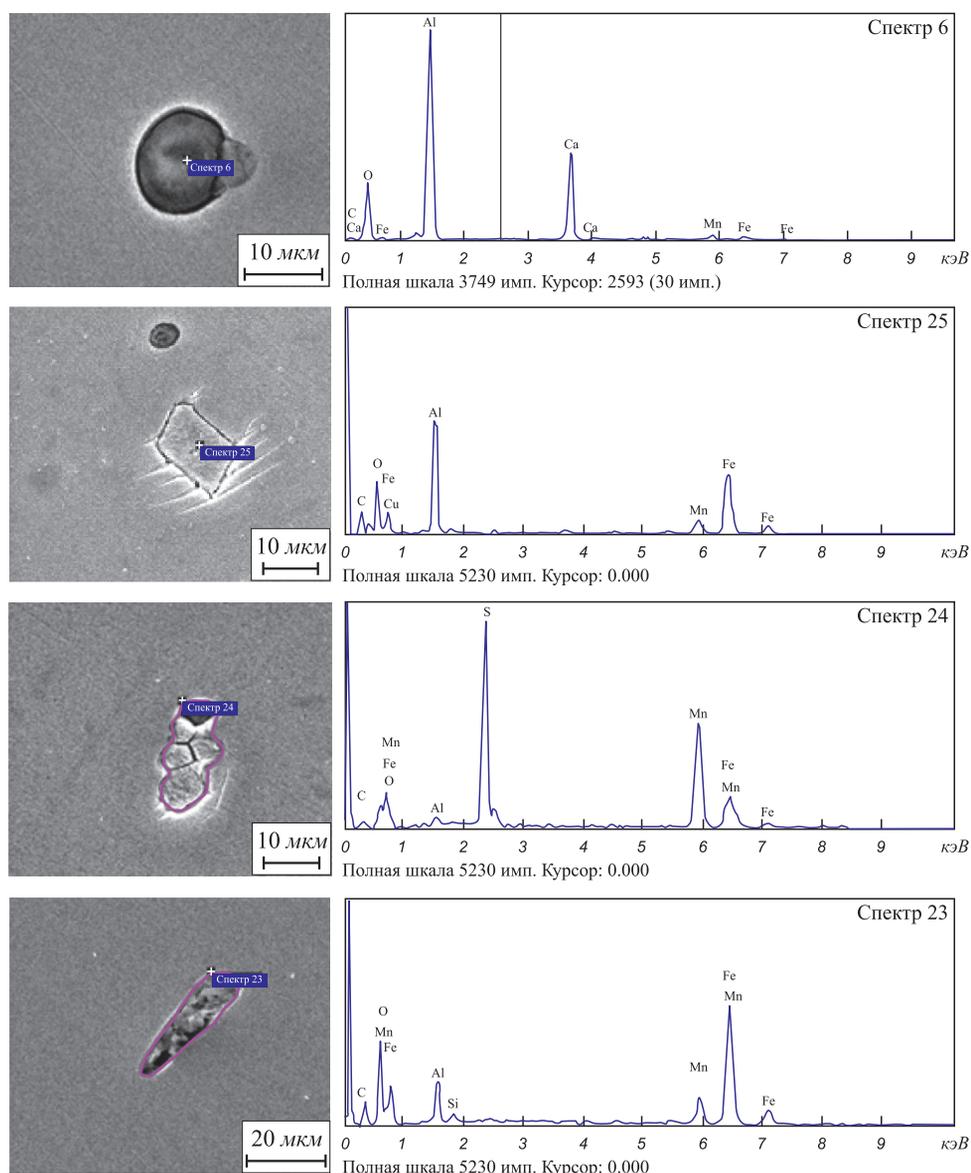


Рис. 3. Неметаллические включения в стали после обработки КСК в ковше:

*а* – комплексный оксид кальция и алюминия; *б* – оксид алюминия; *в* – комплексный оксисульфид; *г* – оксид марганца и алюминия

Fig. 3. Non-metallic inclusions in steel after CSC processing in the ladle:

*a* – complex oxide of calcium and aluminum; *b* – aluminum oxide; *v* – integrated oxysulfide; *z* – oxide of manganese and aluminum

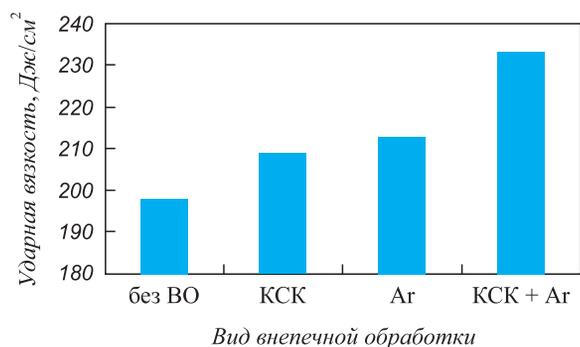


Рис. 4. Средние значения ударной вязкости стали марки 110Г13Л в зависимости от внепечной обработки

Fig. 4. Average values of impact toughness of 110G13L steel depending on the secondary treatment

качестве лигатур были выбраны азотированный феррохром и феррованадий.

Хром, введенный в сталь в качестве добавки, способен растворяться в аустените и образовывать карбиды. Ванадий образует карбиды типа VC. Комплексное действие ванадия и марганца заключается в том, что марганец понижает температуру области аустенизации, тем самым расширяя ее и увеличивая степень переохлаждения. Это создает условия для выделения большого количества карбидов ванадия [15].

Азот, растворяясь в аустените, способствует его упрочнению. Кроме того, наличие азота в металле приводит к образованию нитридов.

При легировании марганцовистой стали выбранными материалами получено содержание хрома в ее

составе в пределах 0,5 – 0,8 %, ванадия в интервале 0,1 – 0,2 %.

В процессе изучения микроструктуры образцов, отобранных от приливных проб полученных отливок, обнаружены карбиды ванадия и хрома.

Легирование хромом, ванадием и азотом способствовало повышению ударной вязкости марганцовистой стали в среднем до значения более 400 Дж/см<sup>2</sup>.

**Выводы.** Внепечная обработка, заключающаяся в обработке расплава кальций-стронциевым карбонатом, а также продувке аргоном, способствует снижению количества неметаллических включений на 50 % при использовании этих способов по отдельности, и на 65 % – совместно.

После обработки расплава кальций-стронциевым карбонатом происходит повышение ударной вязкости на 5,5 %; после продувке аргоном – на 7,6 %, а при комплексной обработке (КСК + продувка) ударная вязкость повышается на 17,7 %.

Легирование стали 110Г13Л азотированным феррохромом и ванадием способствует увеличению ударной вязкости на 76 %.

Требуются дополнительные исследования по определению рационального количества вводимых легирующих и модифицирующих добавок, а также по корректировке режимов термической обработки с учетом легирования и модифицирования.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шульте Ю.А. Неметаллические включения в электростали. – М.: Metallurgia, 1964. – 207 с.
2. Явойский В.И., Рубенчик Ю.И., Оженко А.П. Неметаллические включения и свойства стали. – М.: Metallurgia, 1980. – 174 с.
3. Кудрин В.А. Metallurgia стали: Учебник для вузов. – 2-е изд. – М.: Metallurgia, 1989. – 560 с.
4. Ицкович Г.М. Раскисление стали и модифицирование неметаллических включений. – М.: Metallurgia, 1981. – 296 с.
5. Дюдкин Д.А., Кисиленко В.В. Производство стали. Внепечная metallurgia стали. Т. 3. – М.: Теплотехник, 2010. – 544 с.
6. Голубцов В.А., Лунев В.В. Модифицирование стали для отливок и слитков. – Челябинск – Запорожье: ЗНТУ, 2009. – 356 с.
7. Моделирование современных процессов внепечной обработки и непрерывной разливки / О.Б. Исаев, Е.А. Чичкарев, В.В. Кислица и др. – М.: Metallurgizdat, 2008. – 373 с.
8. Вдовин К.Н., Феоктистов Н.А. Влияние обработки стали марки 25Л силикокальцием на неметаллические включения и механические свойства литой заготовки // Технология металлов. 2012. № 12. С. 21 – 26.
9. Вдовин К.Н., Феоктистов Н.А. Влияние серы, кальция алюминия на пластические свойства металла // Теория и технология metallургического производства: Межрегион. сб. науч. тр. / Под ред. В.М. Колокольцева. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2010. Вып. 10. С. 107 – 113.
10. Казаков А.А., Ковалев П.В., Рябошук С.В. Исследование термовременной природы неметаллических включений с целью повышения metallургического качества высокопрочных трубных сталей // Черные металлы. № 12. 2009. С. 5 – 11.
11. Вдовин К.Н., Феоктистов Н.А. Совершенствование технологии обработки литейной стали Са-содержащими материалами // Сталь. № 2. 2014. С. 24 – 29.
12. Модифицирование оксидных и сульфидных включений обработкой кальцием: Пер. с англ. // ОАО «Черметинформация». Новости черной metallurgии за рубежом. 2010. № 1. С. 33 – 35.
13. Моделирование обработки кальцием стали, раскисленной алюминием: Пер. с англ. // ОАО «Черметинформация». Новости черной metallurgии за рубежом. 2009. № 2. С. 40 – 42.
14. Дюдкин Д.А., Кисиленко В.В. Производство стали. Т. 1. Процессы выплавки, внепечной обработки и непрерывной разливки. – М.: Теплотехник, 2008. – 528 с.
15. Филиппенков А.А. Ванадийсодержащие стали для отливок. – Екатеринбург: УрО РАН, 2001. – 350 с.

Поступила 5 октября 2015 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2016. VOL. 59. No. 1, pp. 23–28.

## HIGH-MANGANESE STEEL SMELTING IN ELECTRIC ARC FURNACE. LADLE TREATMENT. REPORT 2

**K.N. Vdovin**<sup>1</sup>, Dr. Sci. (Eng.), Professor; Head of the Chair “Materials Science and Foundry” (kn.vdovin@gmail.com)

**N.A. Feoktistov**<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Eng.), Senior Lecturer of the Chair “Materials Science and Foundry” (fna87@mail.ru)

**E.V. Sinitskii**<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Materials Science and Foundry”

**D.A. Gorlenko**<sup>1</sup>, Assistant of the Chair “Materials Science and Foundry” (gorldima@yandex.ru)

**N.A. Durov**<sup>2</sup>, Cand. Sci. (Eng.), Senior Lecturer of the Chair “Extraction and Recycling of Ferrous Metals”

<sup>1</sup> Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov (38, Lenina ave., Magnitogorsk, 455000, Russia)

<sup>2</sup> National University of Science and Technology “MISIS” (MISIS) (4, Leninskii ave., Moscow, 119049, Russia)

their joint conduct. The quantitative analysis of non-metallic inclusions was made and the location of non-metallic inclusions on grain boundaries was studied. With the help of electronic microscope the authors studied in detail the composition and shape of the inclusions formed at ladle treatment and without it. The mechanism of formation of globular inclusions in steel during solidification of the metal in ladle treatment is described. The effect of different types of ladle treatment on indicators of impact strength of manganese steel was considered, as well as the process of vanadium alloying of manganese steel. The paper presents practical data on the effect of vanadium alloying of manganese steel at a level of toughness.

**Keywords:** secondary processing, non-metallic inclusions, impact strength, volume fraction, vanadium alloying, calcium, strontium carbonate, argon blowing.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2016-1-23-28

#### REFERENCES

1. Shul'te Yu.A. *Nemetallicheskie vkhlyucheniya v elektrostali* [Non-metallic inclusions in electric steel]. Moscow: Metallurgiya, 1964, 207 p. (In Russ.).

2. Yavoiskii V.I., Rubenchik Yu.I., Okenko A.P. *Nemetallicheskie vkhlyucheniya i svoystva stali* [Non-metallic inclusions and properties of steel]. Moscow: Metallurgiya, 1980, 174 p. (In Russ.).
3. Kudrin V.A. *Metallurgiya stali: uchebnik dlya vuzov* [Metallurgy of steel: Textbook for universities]. Moscow: Metallurgiya, 1989, 560 p. (In Russ.).
4. Itskovich G.M. *Raskislenie stali i modifitsirovanie nemetallicheskikh vkhlyuchenii* [Deoxidation of steel and modification of non-metallic inclusions]. Moscow: Metallurgiya, 1981, 296 p. (In Russ.).
5. Dyudkin D.A., Kisilenko V.V. *Proizvodstvo stali. T. 3. Vnepechnaya metallurgiya stali* [Production of steel. Vol. 3 Secondary treatment of steel]. Moscow: Teplotekhnika, 2010, 544 p. (In Russ.).
6. Golubtsov V.A., Lunev V.V. *Modifitsirovanie stali dlya otlivok i slitkov* [Modification of steel for castings and ingots]. Chelyabinsk – Zaporizhia: ZNTU, 2009, 356 p. (In Russ.).
7. Isaev O.B., Chichkarev E.A., Kislitsa V.V. etc. *Modelirovanie sovremennykh protsessov vnepechnoi obrabotki i nepreryvnoi razlivki* [Modeling of modern processes of secondary treatment and continuous casting]. Moscow: Metallurgizdat, 2008, 373 p. (In Russ.).
8. Vdovin K.N., Feoktistov N.A. Influence of processing of 25L steel by silicocalcium on non-metallic inclusions and mechanical properties of cast billets. *Tekhnologiya metallov*, 2012, no. 12, pp. 21–26. (In Russ.).
9. Vdovin K.N., Feoktistov N.A. Effect of sulfur, calcium, aluminum on plastic properties of metal. In: *Teoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva: mezhhregion. sb. nauch. tr.* [Theory and technology of metallurgical production: Interregional coll. of sci. papers]. Kolokol'tsev V.M. ed. Magnitogorsk: GOU VPO «MGTU», 2010, Issue 10, pp. 107–113. (In Russ.).
10. Kazakov A.A., Kovalev P.V., Ryaboshuk S.V. Investigation of thermo-temporary nature of non-metallic inclusions to improve the metallurgical quality of high-strength pipe steels. *Chernye metally*. 2009, no. 12, pp. 5–11. (In Russ.).
11. Vdovin K.N., Feoktistov N.A. Improving the processing technology of casting steel by Ca-containing materials. *Stal'*, 2014, no. 2, pp. 24–29. (In Russ.).
12. Modification of oxide and sulfide inclusions by treatment with calcium. *OAO Chermetinformatsiya. Novosti chernoii metallurgii za rubezhom*, 2010, no. 1, pp. 33–35. (In Russ.).
13. Modeling of processing of aluminum deoxidized steel by calcium. Trans. from Eng. *OAO Chermetinformatsiya. Novosti chernoii metallurgii za rubezhem*, no. 2, 2009, pp. 40–42. (In Russ.).
14. Dyudkin D.A., Kisilenko V.V. *Proizvodstvo stali. T. 1. Protsessy vyplavki, vnepechnoi obrabotki i nepreryvnoi razlivki* [Production of steel. Vol. 1. Smelting processes, out-of-furnace treatment and continuous casting]. Moscow: Teplotekhnika, 2008, 528 p. (In Russ.).
15. Filippenkov A.A. *Vanadiisoderzhashchie stali dlya otlivok* [Vanadium steel for castings]. Ekaterinburg.: UrO RAN, 2001, 350 p. (In Russ.).

**Acknowledgements.** The research was financially supported by the grant of the Russian Scientific Foundation (project no. 15-19-10020).

The work was performed with the participation of A.A. Nefed'ev and A.A. Metelkin.

Received October 05, 2015