

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 669.14.018.95:519.237.8:004.932

DOI: 10.18503/1995-2732-2026-24-3-93-99



ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ КОМПЛЕКСА Cr – N НА ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ И ПАРАМЕТРЫ МИКРОСТРУКТУРЫ СТАЛЬНЫХ ОТЛИВОК

Феоктистов Н.А., Савинов А.С.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Эксплуатационные свойства литых изделий определяют ресурс их работы при эксплуатации. На износостойкость в первую очередь влияет химический состав, а также условия кристаллизации изделия. **Цель работы.** Изучить влияние комплекса Cr – N на эксплуатационные свойства высокомарганцевой стали. **Используемые методы.** Объект исследования – высокомарганцевая сталь, легированная комплексом Cr – N, а также закристаллизовавшаяся в литейной форме при различных скоростях охлаждения. Исследования структуры и свойств проводили на опытных отливках в литом состоянии, а также после термической обработки. Оценка параметров микроструктуры опытных сталей проводилась при помощи оптического и электронного микроскопа, износостойкость оценивали через коэффициент абразивной и ударно-абразивной износостойкости по ГОСТ 23.208-79 и ГОСТ 23.207-79. **Новизна.** Определены концентрационные интервалы по содержанию хрома и азота, при которых коэффициенты абразивной и ударно-абразивной износостойкости имеют максимальные значения. **Результат.** Выявлены закономерности влияния скорости охлаждения расплава в комплексе с хромом и азотом на коэффициенты абразивной и ударно-абразивной износостойкости, а также изменение количественных характеристик карбидной фазы. Определено влияние этих факторов на коэффициент анизотропии зерна аустенита, оказывающий сильное влияние на механические и эксплуатационные свойства отливок. Определено влияние термической обработки на химический состав сплава и обезуглероживания поверхности опытных отливок, а также количественные характеристики микроструктуры. **Практическая значимость.** В работе сформулированы рекомендации использования комплекса Cr – N для легирования стали Гадфильда с целью получения заданных характеристик.

Ключевые слова: высокомарганцевая сталь, хром, азот, износостойкость, карбидная фаза, размера зерна, аустенит, марганец, цементит

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования России (проект FZRU-2026-0003).

© Феоктистов Н.А., Савинов А.С., 2026

Для цитирования

Феоктистов Н.А., Савинов А.С. Оценка влияния комплекса Cr – N на износостойкость и параметры микроструктуры стальных отливок // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2026. Т. 24. №3. С. 93-99. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-3-93-99>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

ASSESSMENT OF THE EFFECT OF THE Cr – N COMPLEX ON THE WEAR RESISTANCE AND MICROSTRUCTURAL PARAMETERS OF STEEL CASTINGS

Feoktistov N.A., Savinov A.S.

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). The service properties of cast products determine their service life under operating conditions. Wear resistance is primarily affected by the chemical composition, as well as by the solidification conditions of the product. **Objectives.** The research is aimed at investigating the effect of the Cr–N complex on the service properties of high-manganese steel. **Methods Applied.** The research object is high-manganese steel alloyed with the Cr–N complex and solidified in a casting mold at different cooling rates. The structure and properties have been studied using experimental castings in the as-cast condition and after heat treatment. The microstructural parameters of the experimental steels have been evaluated using optical and electron microscopy. Wear resistance has been assessed using the coefficients of abrasive and impact-abrasive wear resistance in accordance with GOST 23.208-79 and GOST 23.207-79. **Originality.** Concentration ranges of chromium and nitrogen have been determined at which the coefficients of abrasive and impact-abrasive wear resistance reach their maximum values. **Results.** The patterns of the effect of melt cooling rate in combination with chromium and nitrogen on the coefficients of abrasive and impact-abrasive wear resistance, as well as on changes in the quantitative characteristics of the carbide phase, have been identified. The effect of these factors on the austenite grain anisotropy coefficient, which has a significant influence on the mechanical and service properties of castings, has been determined. The effect of heat treatment on the chemical composition of the alloy and surface decarburization of the experimental castings, as well as on the quantitative characteristics of the microstructure, has been determined. **Practical Relevance.** Recommendations are formulated for the use of the Cr–N complex as an alloying addition to Hadfield steel in order to obtain specified performance characteristics.

Keywords: high-manganese steel, chromium, nitrogen, wear resistance, carbide phase, grain size, austenite, manganese, cementite

This research was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Project FZRU-2026-0003)

For citation

Feoktistov N.A., Savinov A.S. Assessment of the Effect of the Cr – N Complex on the Wear Resistance and Microstructural Parameters of Steel Castings. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2026, vol. 24, no. 3, pp. 93-99. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-3-93-99>

Введение

В настоящее время потребители литейной продукции предъявляют всё более жесткие требования к её качеству. В первую очередь это касается деталей, работающих в тяжёлых условиях эксплуатации: в условиях действия повышенных температур, агрессивных сред, абразивного и ударно-абразивного изнашивания, действия высоких контактных нагрузок. Для каждой группы деталей используются сплавы, предназначенные для работы в таких условиях.

Среди множества сталей, применяющихся в качестве конструкционных материалов для отливок, работающих в условиях различных видов изнашивания, наиболее распространённой является высокомарганцевая сталь, в частности сталь Гадфильда. Несмотря на то, что она применяется в промышленности с давних времён, интерес к ней не пропадает по сегодняшний день как среди отечественных исследователей, так и среди зарубежных.

Авторы работ [1–3] занимались изучением влияния химического состава стали Гадфильда на такие свойства, как ударная вязкость и твёрдость. Они построили ряд элементов по уменьшению степени влияния на эти свойства. В работах [4–7] изучен вопрос влияния таких легирующе-модифицирующих элементов и комплексов, как титан, кальций, ванадий, кальций-стронциевый карбонаты и редкоземельные металлы, на прочностные и пластические свойства высокомарганцевой стали, а также на её микроструктуру. Отмечено положительное действие этих элементов на указанные параметры. В работах [5–7] установлено влияние карбоната на величину переохлаждения, которая снижается с 40 до 10°C при введении карбоната в сталь порядка 0,8% от массы обрабатываемого металла. При этом уменьшается размер карбидов с 18–145 до 5–15 мкм, зерно измельчается до 3–4 баллов, а ударная вязкость увеличивается максимум на 40%.

Однако в этих работах осталось неизученным влияние химического состава стали на главное её свойство – износостойкость. Износостойкость стали Гадфильда определяется множеством факторов, таких как химический состав, тепловое формирование отливки в форме (скорость охлаждения расплава), режим термической обработки и т.д.

Значительное влияние на износостойкость оказывают тепловые условия формирования отливок в литейной форме, а именно скорость охлаждения расплава в форме. Исследованию этого влияния посвящён ряд работ [8–11]. В них отмечено, что скорость охлаждения расплава в литейной форме воздействует на размер зерна аустенита и параметры карбидной фазы. В зависимости от скорости охлаждения абразивная износостойкость этой стали может изменяться более чем на 20%. Кроме того, в работах [9, 10] установлено, что скорость охлаждения расплава в форме влияет на энергию дефектов упаковки, величина которой определяет механизм упрочнения этой стали (деформационное двойникование или дислокационное скольжение) под действием внешних нагрузок. Также авторы работ установили зависимость между энергией дефектов упаковки и абразивной износостойкостью.

Для того чтобы сформулировать адекватные рекомендации по использованию этой стали в качестве конструкционного материала для работы в тех или иных условиях (абразивный или ударно-абразивный износ), необходимо оценить её износостойкость в различных условиях, влияние на это свойство легирования тем или иным элементом в комплексе с тепловыми условиями формирования отливки в литейной форме.

Материалы и методы исследования

Экспериментальные сплавы для изучения структуры и свойств выплавляли в индукционной печи ИСТ-006 с основной футеровкой. Термическую обработку образцов проводили в окислительной среде. Легирование стали Гадфильда осуществляли азотированным феррохромом марки ФХН – 1, химический состав которого, мас. доля, %: 66,2 Cr; 0,06 C; 0,72 Si; 0,003 P; 0,004 S; 0,09 Al; 11,1 N.

Исследования проводили на стандартных образцах с размерами 35×35×10 мм. Для реализации раз-

личных скоростей охлаждения сплав заливали в разные типы форм: сухую и сырую песчано-глинистую, кокиль. Регистрацию изменения температуры металла проводили с помощью заформованной вольфрам-рениевой термопары, запись результатов осуществляли на приборе LA-50USB с частотой 50 Гц на каждый канал. Химический состав образцов определяли на спектрометре SPECTRMAXx.

Размер зерен и количественный анализ проводили на оптическом микроскопе Meiji с помощью программы Ticsomet Standart Pro по ГОСТ 5639-82. Для микроанализа из образца по стандартной методике были приготовлены микрошлифы путём запрессовки образцов в смолу «Transoptic» на автоматическом прессе Simplimet 1000 на линии пробоподготовки фирмы Buechler. Для выявления микроструктуры поверхность шлифов подвергали травлению в 4%-м растворе азотной кислоты в этиловом спирте методом погружения полированной поверхности в ванну с реактивом.

Микротвердость определяли на твердомере Buchler Mikromet в соответствии с ГОСТ 9450-60 методом вдавливания алмазной пирамидки с углом между противоположными гранями 136° при нагрузке 200 г и длительности нагружения 10 с. Твердость определяли на твердомере EmcoTest M4C 075 G3 в соответствии с ГОСТ 9013-59.

Абразивную износостойкость сплавов изучали в соответствии с ГОСТ 23.208-79, ударно-абразивную – с ГОСТ 23.207 – 79.

Полученные результаты и их обсуждение

Проведя серию экспериментов по выплавке и легированию высокомарганцевой стали марки 110Г13Л азотированным феррохромом марки ФХН – 10, получили экспериментальные образцы, химический состав которых в литом и термообработанном состоянии представлен в **табл. 1**. Концентрация алюминия находилась в пределах от 0,08 до 0,06%.

Результаты испытаний образцов на абразивную и ударно-абразивную износостойкость, выраженные в виде коэффициентов износостойкости, представлены в **табл. 2**.

Таблица 1. Химический состав экспериментальных отливок
Table 1. Chemical composition of the experimental castings

№ п/п	Концентрация химических элементов, %													
	C, %		Si, %		Mn, %		P, %		S, %		Cr, %		N, %	
	*	**	*	**	*	**	*	**	*	**	*	**	*	**
1	1,15	0,60	1,05	0,65	11,6	11,3	0,04	0,050	0,033	0,045	0,85	0,84	0,03	0,033
2	1,10	0,59	1,18	0,81	11,75	9,8	0,04	0,046	0,035	0,048	1,40	1,35	0,06	0,062
3	1,07	0,70	0,90	0,87	11,55	11,7	0,04	0,050	0,032	0,045	1,91	1,90	0,12	0,127
4	1,20	0,33	0,74	0,93	11,60	10,4	0,04	0,056	0,033	0,032	2,15	2,08	0,135	0,137
5	1,15	0,42	1,08	0,98	11,75	11,3	0,04	0,043	0,033	0,040	3,15	3,15	0,345	0,351

* Концентрация элемента до термической обработки.

** Концентрация элемента после термической обработки.

Таблица 2. Значения коэффициента абразивной и ударно-абразивной износостойкости в зависимости от концентрации хрома в стали, типа формы и состояния металла

Table 2. Values of the coefficients of abrasive and impact-abrasive wear resistance depending on the chromium concentration in the steel, mold type, and metal condition

Номер образца	Абразивный износ			Ударно-абразивный износ		
	Сырая ПГФ Л/ТО	Сухая ПГФ Л/ТО	Кокиль Л/ТО	Сырая ПГФ Л/ТО	Сухая ПГФ Л/ТО	Кокиль Л/ТО
1	1,0 / 1,38	1,25 / 1,39	1,09 / 1,48	- / -	- / -	- / -
2	1,67 / 1,28	1,62 / 1,31	1,76 / 1,23	1,59 / 1,2	1,43 / 1,4	0,91 / 0,99
3	1,55 / 1,32	1,47 / 1,41	1,58 / 1,25	1,76 / 1,14	1,14 / 1,13	0,88 / 1,17
4	2,08 / 1,19	2,05 / 1,44	2,11 / 1,35	2,11 / 1,66	0,87 / 0,89	1,42 / 1,32
5	1,8 / 1,23	1,74 / 1,5	1,83 / 1,29	1,59 / 1,46	0,83 / 0,67	2,33 / 1,15

Л – в литом состоянии; ТО – в термообработанном состоянии.

Согласно данным, представленным в табл. 2, в литом состоянии исследуемая сталь обладает максимальным значением коэффициента абразивной износостойкости ($> 2,0$ ед.) при содержании в ней хрома около 2,0%. При большем или меньшем содержании хрома этот коэффициент снижается на 15–20%. Такая тенденция характерна для всех экспериментальных образцов независимо от скорости охлаждения сплава в литейной форме, то есть типа формы, в которую залиты образцы.

Термическая обработка способствует снижению коэффициентов абразивной износостойкости экспериментальных образцов на 23–36%. Максимальное значение коэффициента (1,5 ед.) достигнуто на образце, залитом в сухую песчано-глинистую форму, с содержанием хрома 3,15%.

Значения коэффициентов износостойкости для образцов, залитых в сухую ПГФ, увеличиваются при увеличении концентрации хрома в составе стали. Для образцов, залитых в сырую ПГФ, происходит снижение значения коэффициентов износостойкости при достижении концентрации хрома более 2,0%. Аналогичная зависимость характерна для образцов, залитых в кокиль [11].

В литом состоянии коэффициент износостойкости определяется наличием вторичной фазы, её морфологией, а также расположением относительно зерна аустенита.

На коэффициент износостойкости в литом состоянии оказывают существенное влияние следующие факторы: размер зерна аустенита, его анизотропия (отношение длины к ширине), распределение химических элементов между аустенитом и избыточной фазой. Кроме того, в обоих случаях на износостойкость будет влиять микротвёрдость аустенита, которая меняется от степени легированности аустенита химическими элементами, изменяющейся в зависимости от скорости охлаждения расплава в литейной форме, а также состояния металла (литой, термообработанный).

При проведении исследований о влиянии легирования хромом, состояния отливки и типа формы на средний размер зерна аустенита, его анизотропию было установлено, что с увеличением концентрации хрома в составе стали Гадфильда происходит увели-

чение среднего размера зерна аустенита как в литом, так и термообработанном состояниях независимо от типа формы. При увеличении скорости охлаждения расплава в литейной форме (сырая ПГФ – сырая ПГФ – кокиль) наблюдается уменьшение среднего размера зерна в литом состоянии и после термической обработки.

По мере увеличения концентрации хрома в стали при одновременном увеличении скорости охлаждения сплава в литейной форме происходит увеличение рассматриваемого коэффициента анизотропии зерна аустенита, то есть увеличивается его «вытянутость» и в литом, и в термообработанном состояниях.

С увеличением количества хрома в стали и скорости охлаждения сплава в период кристаллизации анизотропия (вытянутость) зёрен увеличивается. После термической обработки зёрна приобретают более округлые формы, что отражается в уменьшении коэффициента анизотропии.

Максимальное значение коэффициента анизотропии наблюдается при содержании хрома порядка 2,0%. При этом же содержании хрома наблюдается качественная смена характера влияния скорости охлаждения на его величину. При концентрации хрома менее 2,0% увеличение скорости охлаждения сплава в форме способствует снижению значения коэффициента анизотропии, а при содержании хрома более 2,0% наблюдается противоположная картина. Следует отметить, что установленная тенденция прослеживается для литого и термообработанного состояний [11].

Легирование азотированным феррохромом приводит к изменению микротвёрдости аустенита и твёрдости экспериментальных отливок. При проведении исследований было определено, что при увеличении концентрации хрома микротвёрдость аустенита в литом состоянии увеличивается в среднем на 8%, в термообработанном – на 17%. Следует отметить, что среднее значение микротвёрдости аустенита как в литом, так и термообработанном состоянии, повышается по мере увеличения скорости его охлаждения в литейной форме. Это обусловлено увеличением степени легированности аустенита хромом и марганцем, что, в свою очередь, приводит к уменьшению кар-

бидной фазы [12, 13]. При этом значение твёрдости стали колеблется в пределах от 84 до 90 HRB.

В результате изучения поверхности после различных видов изнашивания – абразивного и ударно-абразивного – установлено, что при контакте абразива с поверхностью стали начинают протекать превращения по механизмам деформационного двойникования или дислокационного скольжения. Преимущественная ориентация деформационных двойников (рис. 1, а) отличается в соседних зернах. Кроме того, в одном зерне аустенита может существовать несколько ориентаций. Помимо двойников, на рис. 1, а представлены включения вторичной фазы (карбиды марганца и хрома) размеров от 0,5 до 3 мкм.

В процессе абразивного изнашивания карбиды хрома вырывает из аустенита, в то время как карбиды марганца раздробливает (рис. 1, б). В процессе ударно-абразивного изнашивания также наблюдается выкрашивание включений марганца.

После углубленного изучения поверхности экспериментальных образцов, сформировавшейся после ударно-абразивного изнашивания, было обнаружено, что она сочетает в себе различные виды структур, сменяющих друг друга и образуя при этом упрочнённый слой. Первый слой, который контактирует с абразивом, ультрамелкозернистый, то есть имеет пара-

метры наноструктуры (рис. 2, а). Далее следует сильно уплотнённый слой деформационного двойникования. За ним располагается слой мартенсита, имеющего характерное игольчатое строение. Эти два слоя чередуются, образуя слоистую структуру, в которой находится от 2 до 5 каждого из слоёв. Следует отметить, что мартенситное превращение протекает с увеличением удельного объёма стали, что способствует сжатию соседних, более податливых областей сплава. Это обуславливает наличие в изношенной поверхности слоёв деформационных двойников с сильным уплотнением. Заканчивается упрочнённый слой областью деформационных двойников с нормальным уплотнением (рис. 2, б).

Заключение

1. Экспериментальным путём установили, что максимальным значением коэффициента износостойкости обладает сталь с содержанием хрома порядка 2,0%.
2. По мере увеличения количества хрома в химическом составе стали происходит увеличение общего количества карбидов в структуре сплава в литом состоянии при одновременном уменьшении доли карбидов марганца и увеличении карбидов хрома.

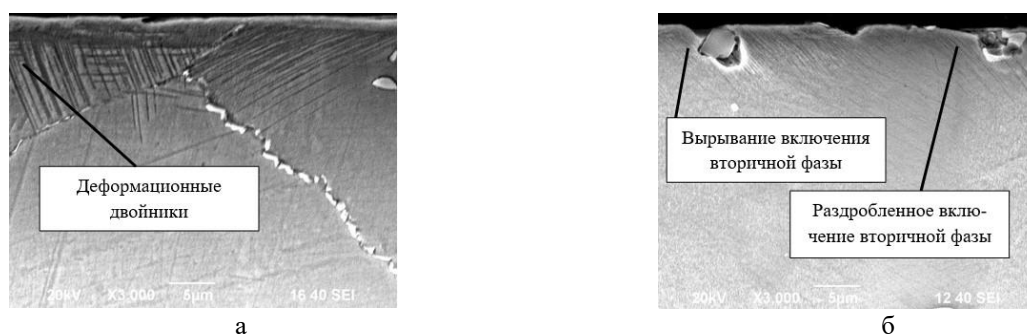


Рис. 1. Микроструктура поверхности износа высокомарганцевой стали в литом состоянии:

а – деформационные двойники; б – включения вторичной фазы

Fig. 1. Microstructure of the wear surface of high-manganese steel in the as-cast condition: a is deformation twins; b is secondary-phase inclusions

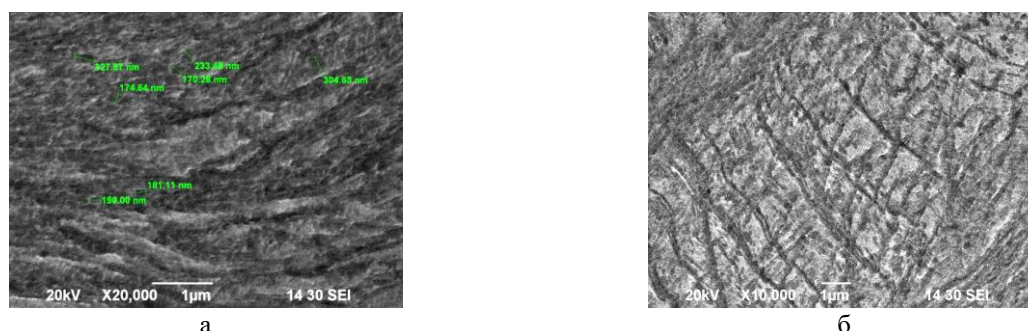


Рис. 2. Структурные области в поверхности, сформировавшейся в процессе ударно-абразивного изнашивания:

а – область ультрамелкого зерна; б – деформационные двойники с нормальным уплотнением

Fig. 2. Structural regions on the surface formed during impact-abrasive wear: a is ultrafine-grained region; b is deformation twins with normal compaction

3. Установлено влияние хрома и скорости охлаждения на анизотропию зерна. При концентрации хрома в химическом составе высокомарганцевой стали около 2,0% происходит качественная смена характера влияния скорости охлаждения сплава в литейной форме на коэффициент анизотропии зерна аустенита.

4. Максимальным значением микротвёрдости обладает высокомарганцевая сталь с содержанием хрома 2,0%.

5. В процессе абразивного изнашивания высокомарганцевой стали протекают деформационные превращения, в результате чего образуется упрочнённый слой.

6. В процессе ударно-абразивного изнашивания наблюдается образование упрочнённого слоя, включающего в себя область ультрамелкого зерна, область деформационных двойников с сильным и нормальным уплотнением, область мартенсита.

Список источников

1. Исследование влияния химического состава стали 110Г13Л на её свойства / Н.И. Бедрин, В.И. Стадничук, А.В. Стадничук и др. // Литейные процессы. 2003. № 3. С. 36–42.
2. Давыдов Н.Г., Благих Б.М., Бигеев А.М. К вопросу повышения качества отливок из высокомарганцевой стали 110Г13Л. Томск: Издательство Томского университета, 1972. 139 с.
3. Давыдов Н.Г. Высокомарганцевая сталь. М.: Металлургия, 1979. 176 с.
4. Колокольцев В.М., Долгополова Л.Б., Мулявко Н.М. Влияние химического состава на структуру и свойства хромомарганцевых аустенитных сталей // Литейные процессы. 2003. № 3. С. 31–36.
5. Федосеев С.Н., Шарафутдинова А.С. Изменение сталеного слитка модифицированием структуры // Актуальные проблемы современного машиностроения: сборник трудов Международной научно-практической конференции. Томск, 2014. С. 355–357.
6. Зыкова А.П., Федосеев С.Н., Лычагин Д.В. Модифицирование стали 110Г13Л // Современные проблемы машиностроения: сборник научных трудов VII Международной научно-технической конференции. 2013. С. 86–90.
7. Обработка стали 110Г13Л барий-стронциевыми карбонатами / В.А. Розум, С.П. Задруцкий, А.П. Беженко и др. // Литые и металлургия. 2010. № 4. С. 89–94.
8. Изучение влияния скорости охлаждения на механические и эксплуатационные свойства стали 110Г13Л / Вдовин К.Н., Феоктистов Н.А., Горленко Д.А., Хренов И.Б., Дерябин Д.А. // Литейщик России. 2015. № 12. С. 23–24.
9. Vdovin K.N., Feoktistov N.A., Gorlenko D.A. Influence of the packing-defect energy on the abrasive wear resistance of Fe-12Mn-1.2C steel casting cooled at different rates // Steel in Translation. 2016, vol. 46, no. 9, pp. 614–619. DOI: 10.3103/S0967091216090138.
10. Calculation of stacking fault energy and its influence on abrasive wear resistance of Hadfield cast steel cooled at different rates / Kolokoltsev V.M., Vdovin K.N., Gorlenko D.A., Gulina A.E. // CIS Iron and Steel Review. 2016, no. 11, pp. 35–39. DOI: <http://dx.doi.org/10.17580/cisirs.2016.01.06>.
11. Исследование механических и эксплуатационных свойств высокомарганцевой стали, легированной азотированным феррохромом / Колокольцев В.М., Вдовин К.Н., Чернов В.П., Феоктистов Н.А., Горленко Д.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. № 3. С. 46–54.
12. Vdovin K.N., Gorlenko D.A., Feoktistov N.A. Characteristics of excess phase in cast high-manganese steel // Steel in Translation, 2016, vol. 46, no. 7, pp. 484–488. Doi: 10.3103/S0967091216070159.
13. Vdovin K.N., Feoktistov N.A., Gorlenko D.A. The Effect of the Cast high-manganese steel primary structure on its properties // Materials Science Forum. vol. 870, pp. 339–344. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.870.339.

References

1. Bedrin N.I., Stadnichuk V.I., Stadnichuk A.V., et al. Study of the effect of the chemical composition of 110G13L steel on its properties. *Liteyny protsessy* [Foundry Processes]. 2003;(3):36-42. (In Russ.)
2. Davydov N.G., Blagikh B.M., Bigeev A.M. *K voprosu povysheniya kachestva otlivok iz vysokomargantsevoi stali 110G13L* [On improving the quality of castings made of high-manganese 110G13L steel]. Tomsk: Tomsk University Publishing House, 1972, 139 p. (In Russ.)
3. Davydov N.G. *Vysokomargantsevaya stal* [High-Manganese Steel]. Moscow: Metallurgiya, 1979, 176 p. (In Russ.)
4. Kolokoltsev V.M., Dolgoplova L.B., Mulyavko N.M. Effect of chemical composition on the structure and properties of chromium-manganese austenitic steels. *Liteyny protsessy* [Foundry Processes]. 2003;(3):31-36. (In Russ.)
5. Fedoseev S.N., Sharafutdinova A.S. Modification of a steel ingot by modifying its structure. *Sbornik trudov Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Aktualnye problemy sovremennogo mashinostroeniya»* [Proceedings of the International Scientific and Practical Conference "Current Problems of Modern Mechanical Engineering"]. 2014, pp. 355-357. (In Russ.)
6. Zykova A.P., Fedoseev S.N., Lychagin D.V. Modification of 110G13L steel. *Sbornik nauchnykh trudov VII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Sovremennye problemy mashinostroeniya»* [Proceedings of the VII International Scientific and Technical Conference "Current Problems of Mechanical Engineering"]. 2013, pp. 86-90. (In Russ.)
7. Rozum V.A., Zadrutskiy S.P., Bezhenok A.P., et al. Treatment of 110G13L steel with barium-strontium carbonates. *Lite i metallurgiya* [Foundry and metallurgy]. 2010;(4):89-94. (In Russ.)
8. Vdovin K.N., Feoktistov N.A., Gorlenko D.A., Khrenov I.B., Deryabin D.A. Study of the effect of cooling rate on the mechanical and operational properties of 110G13L steel. *Liteyshchik Rossii* [Foundryman of Russia]. 2015;(12):23-24. (In Russ.)
9. Vdovin K.N., Feoktistov N.A., Gorlenko D.A. Influence of the packing-defect energy on the abrasive wear resistance of Fe-12Mn-1.2C steel casting cooled at different rates. *Steel in Translation*. 2016;46 (9):614-619. DOI: 10.3103/S0967091216090138.

10. Kolokoltsev V.M., Vdovin K.N., Gorlenko D.A., Gulin A.E. Calculation of stacking fault energy and its influence on abrasive wear resistance of Hadfield cast steel cooled at different rates. CIS Iron and Steel Review. 2016;(11):35-39. DOI: 10.17580/cisr.2016.01.06.
11. Kolokoltsev V.M., Vdovin K.N., Chernov V.P., Feoktistov N.A., Gorlenko D.A. Study of the mechanical and operational properties of high-manganese steel alloyed with nitrated ferrochrome. *Vestnik MGTU im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2016;(3):46-54. (In Russ.)
12. Vdovin K.N., Gorlenko D.A., Feoktistov N.A. Characteristics of excess phase in cast high-manganese steel. Steel in Translation. 2016;46(7):484-488. DOI: 10.3103/S0967091216070159.
13. Vdovin K.N., Feoktistov N.A., Gorlenko D.A. The effect of the cast high-manganese steel primary structure on its properties. Materials Science Forum. 2017;870:339-344. Doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.870.339.

Поступила 31.08.2026; принята к публикации 21.09.2026; опубликована 30.09.2026
Submitted 31/08/2026; revised 21/09/2026; published 30/09/2026

Феоктистов Николай Александрович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой литейных процессов и материаловедения, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: fna87@mail.ru. ORCID 0000-0002-6091-7983

Савинов Александр Сергеевич – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой механики, директор института металлургии, машиностроения и материалов обработки, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: savinov_nis@mail.ru. ORCID 0000-0001-7440-5404

Nikolay A. Feoktistov – PhD (Eng), Associate Professor, Head of the Department Casting Processes and Materials Science, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: fna87@mail.ru, ORCID 0000-0002-6091-7983

Aleksandr S. Savinov – DrSc. (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Mechanics, Director of the Institute of Metallurgy, Mechanical Engineering and Materials Processing, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: savinov_nis@mail.ru. ORCID 0000-0001-7440-5404