

УДК 621.74

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЛЕГИРОВАНИЯ И ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА АБРАЗИВНУЮ И УДАРНО-АБРАЗИВНУЮ ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ВЫСОКОМАРГАНЦЕВОЙ СТАЛИ\*

*Вдовин К.Н., д.т.н., профессор, зав. кафедрой технологий металлургии и литейных процессов ([kn.vdovin@gmail.com](mailto:kn.vdovin@gmail.com))*

*Феоктистов Н.А., к.т.н., доцент кафедры технологий металлургии и литейных процессов*

*Горленко Д.А., к.т.н., старший преподаватель кафедры технологий металлургии и литейных процессов*

*Чернов В.П., д.т.н., профессор кафедры технологий металлургии и литейных процессов*

*Хренов И.Б., магистрант кафедры технологий металлургии и литейных процессов*

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова  
(455000, Россия, Челябинская обл., Магнитогорск, пр. Ленина, 38)

**Аннотация.** В работе рассмотрены основные факторы, которые влияют на износостойкость высокомарганцевой стали, а также представлен обзор отечественных и зарубежных научных трудов, посвященных изучению этой проблемы. Сделаны выводы по материалам, представленным в изученных работах, а также сформулирована цель исследований, имеющих большую актуальность для промышленных предприятий, производящих и эксплуатирующих детали из стали Гадфильда. Рассмотрены материалы, использованные для обработки жидкой стали, технология получения экспериментальных изделий из высокомарганцевой стали, химический состав сплава, взятый за базу, методика и оборудование, применяющееся для определения скорости охлаждения сплавов в литейной форме, а также для изучения износостойкости в условиях абразивного и ударно-абразивного изнашивания, закалки и термического анализа. Представлены результаты исследований по легированию стали Гадфильда азотированными ферросплавами и комплексной лигатурой. Графически показаны зависимости коэффициентов абразивной и ударно-абразивной износостойкости при реализации различных схем легирования исследуемой стали выбранными материалами. Кроме этого, представлены результаты влияния использованных легирующих элементов на износостойкость высокомарганцевой стали при реализации различных условий изнашивания. Установлены концентрации легирующих элементов, при которых коэффициент абразивной и ударно-абразивной износостойкости имеет максимальное значение. Кроме того, приведены результаты термического анализа. Изучены процессы, протекающие при нагреве отливок из стали Гадфильда под закалку. Установлены температурные интервалы протекания таких процессов, как выделение избыточных фаз, растворение легированного цементита в аустените, полное растворение фосфидной эвтектики и карбидов легирующих элементов. Также определены температурные границы протекания процессов окисления стали и ее обезуглероживания. По результатам проведенных исследований даны некоторые рекомендации по увеличению износостойкости отливок из высокомарганцевой стали для различных условий эксплуатации и выбору температур для проведения термической обработки этих изделий.

**Ключевые слова:** высокомарганцевая сталь, азотированные ферросплавы, легирование, аустенит, износостойкость, избыточная фаза, закалка.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-11-904-909

На износостойкость литых деталей из высокомарганцевой стали влияют различные факторы: химический состав сплава, режим термической обработки, а также условия, в которых происходит процесс изнашивания. С целью повышения эксплуатационных свойств изделий из высокомарганцевой стали в литейных цехах осуществляют легирование и модифицирование ее различными материалами [1, 2].

В научной литературе приведены экспериментальные и производственные данные по легированию и модифицированию высокомарганцевой стали такими материалами, как хром [3], легирующе-модифицирующий комплекс титан-бор-кальций [4], молибден, никель и редкоземельные металлы [5, 6],

кальций и барий стронциевые карбонаты [7, 8], комплекс ферросиликоалюминий с титаном [9], ниобий [10], алюминий [11, 12], медь [13] и др. Однако во всех представленных работах основное внимание уделяется изучению микроструктуры, механических характеристик, что не всегда является прямым отражением эксплуатационных свойств.

Кроме всего этого, в работах отечественных и зарубежных исследователей не отражены данные по совместному влиянию тепловых условий формирования отливок (скорости охлаждения сплава) в литейной форме и легирования на свойства высокомарганцевой стали. При изготовлении деталей методом литья скорость охлаждения сплава может изменяться в зависимости от металлоемкости формы и габаритов отливки. При этом скорость охлаждения сплава в форме будет влиять на

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

распределение легирующих элементов между вторичной фазой и аустенитом, изменяя степень легированности последнего [14, 15]. Это, в свою очередь, будет определять комплекс уникальных свойств, присущих стали Гадфильда, а также ее износостойкость.

Изделия из высокомарганцевой стали в обязательном порядке подвергают термической обработке с целью растворения вторичных фаз, располагающихся по границам зерен [16, 17]. Легирование и модифицирование стали приводит к выделению новых видов карбидов, нитридов. Для проведения термической обработки необходимо знать температурные интервалы, в которых происходит растворение вновь образовавшихся избыточных фаз. Подобного рода данные в научной литературе отсутствуют.

Условия, в которых происходит изнашивание изделий из высокомарганцевой стали, вносят существенное влияние на количественные показатели этого процесса. Как правило, изделия из высокомарганцевой стали работают в условиях абразивного (зуб ковша экскаватора, желоб дробилки) и ударно-абразивного (щеки и молотки дробилок) изнашивания [18]. При различии во внешних условиях в сплаве реализуются принципиально разные механизмы этого процесса, а износостойкость сплава одного и того же химического состава может значительно отличаться в условиях абразивного и ударно-абразивного изнашивания.

Таким образом, целью данной работы являлось исследование комплексного влияния химического состава высокомарганцевой стали и скорости охлаждения изделий из нее в литейной форме на абразивную и ударно-абразивную износостойкость, а также обоснование температурных параметров термической обработки при реализации различных схем легирования.

Материалом для исследования служили литые образцы высокомарганцевистой стали с базовым химическим составом, % (по массе), представленным ниже:

C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Al
1,2	0,9	12,3	0,024	0,033	0,8	0,12	0,06

Химический состав образцов определяли на спектрометре фирмы SPECTRO, модель МАХх.

С целью кристаллизации и охлаждения высокомарганцевой стали с различными скоростями сплав заливали в формы с разной теплоаккумулирующей способностью: сухую и сырую песчано-глинистые формы, кокиль. Изменение температуры залитого металла во времени регистрировали с помощью вольфрам-рениевой термопары, которая была установлена в форму в процессе формовки. Результаты записывали при помощи аналого-цифрового преобразователя LA-50USB с частотой 50 Гц на каждый канал с возможностью одновременной записи по четырем каналам. Скорость охлаждения сплава в температурных интервалах кристаллизации и охлаждения определяли по кривой охлаждения.

Базовый состав высокомарганцевой стали легировали следующими ферросплавами: азотированный феррохром ФХН-10, азотированная титан-кальциевая лигатура, азотированный феррованадий производства НПО «Эталон» (г. Магнитогорск). После этого определяли износостойкость сплавов в зависимости от содержания в них легирующих элементов.

Термическую обработку осуществляли в нагревательной печи сопротивления «НАКАЛ» в окислительной среде.

Испытание на износостойкость проводили на лабораторных установках в соответствии с ГОСТ 23.208 – 79 (абразивная износостойкость) и ГОСТ 23.207 – 79 (ударно-абразивная износостойкость).

Процессы, протекающие в высокомарганцевых сталях при нагреве под закалку, изучали на приборе синхронного термического анализа STA (Jupiter 449 F3) фирмы NETZSCH методами дифференциально-сканирующей калориметрии и термогравиметрии.

В ходе работы получены экспериментальные образцы из высокомарганцевой стали, легированные различным количеством азотированных ферросплавов: феррохром, титан-кальциевая лигатура, феррованадий. Проведено несколько серий экспериментов по легированию стали Гадфильда каждым из упомянутых ферросплавов. При легировании исследуемой стали азотированным феррохромом концентрация хрома в составе сплава достигала 3,15 %.

Влияние хрома на абразивную и ударно-абразивную износостойкость в зависимости от скорости охлаждения расплава в литейной форме в интервале кристаллизации представлено на [рис. 1](#). Видно, что при легировании высокомарганцевой стали азотированным феррохромом следует обеспечивать концентрацию хрома в составе стали в пределах 2,0 – 2,5 %. При такой концентрации хрома отливки из этой стали будут иметь максимальную износостойкость в условиях абразивного и ударно-абразивного изнашивания.

Увеличение износостойкости исследуемой стали после легирования азотированным феррохромом обусловлено изменениями параметров макро- и микроструктуры, а также формированием карбидов хрома. Это подробно рассмотрено в работах [19, 20].

Из графиков, представленных на [рис. 2](#), следует, что максимальные значения абразивной и ударно-абразивной износостойкости стали Гадфильда получены при концентрации титана в составе сплава в пределах от 0,04 до 0,08 %. Дальнейшее повышение концентрации титана в исследуемом сплаве приводит к снижению абразивной и ударно-абразивной износостойкости. При этом максимальными значениями износостойкости обладает сталь, скорость охлаждения которой в литейной форме составляла 8,9 °C/с.

Наибольшее увеличение коэффициента износостойкости стали при ударно-абразивном изнашивании наблюдали после легирования высокомарганцевой стали

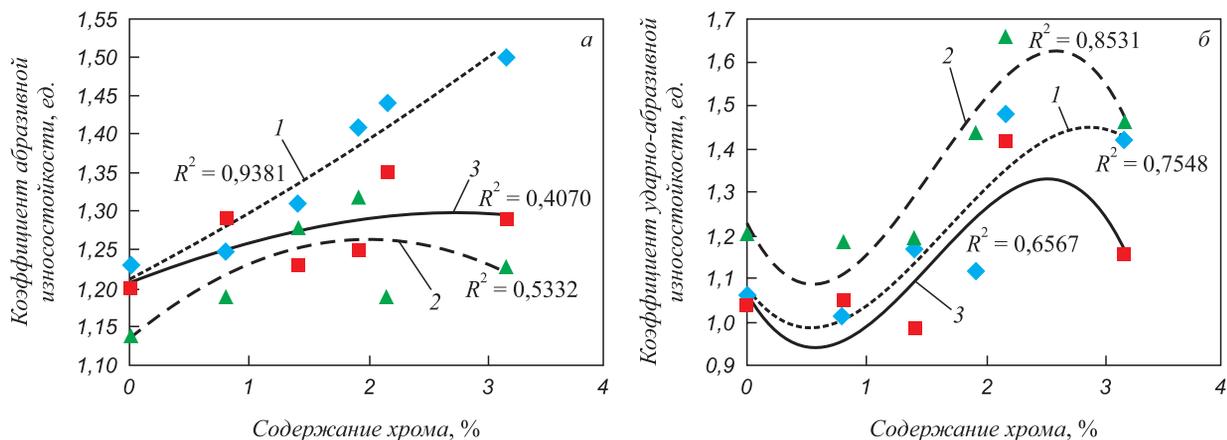


Рис. 1. Влияние легирования стали Гадфильда азотированным феррохромом на абразивную (а) и ударно-абразивную (б) износостойкость в зависимости от скорости охлаждения сплава в литейной форме, °C/c:  
1 – 4,5; 2 – 8,9; 3 – 25

Fig. 1. Influence of alloying of Hadfield steel with nitride ferrochromium on abrasive (a) and impact-abrasive (b) wear resistance depending on cooling rate of the melt in casting mold at °C/s:  
1 – 4.5; 2 – 8.9; 3 – 25

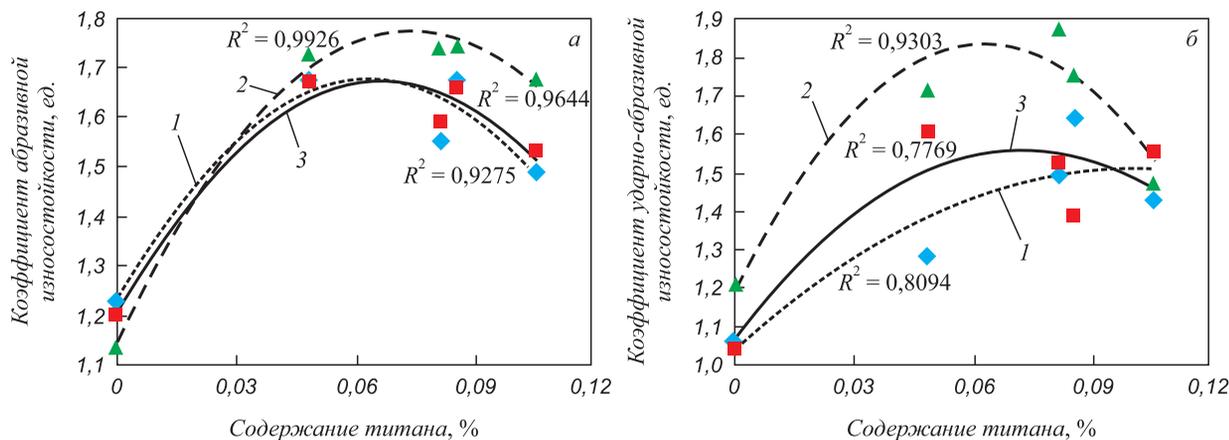


Рис. 2. Влияние микролегирования стали Гадфильда азотированной титан-кальциевой лигатурой на абразивную (а) и ударно-абразивную (б) износостойкость в зависимости от скорости охлаждения сплава в литейной форме, °C/c:  
1 – 4,5; 2 – 8,9; 3 – 25

Fig. 2. Influence of microalloying of Hadfield steel with nitride titanium-calcium alloy on abrasive (a) and impact-abrasive (b) wear resistance depending on cooling rate of the melt in casting mold at °C/s:  
1 – 4.5; 2 – 8.9; 3 – 25

ванадием. Зависимость коэффициента абразивной и ударно-абразивной износостойкости высокомарганцевой стали от концентрации ванадия в сплаве представлена на [рис. 3](#).

Концентрация ванадия в сплаве находилась в пределах от 0,01 до 0,4 %. Установлено, что коэффициент абразивной износостойкости высокомарганцевой стали повышается на 30 – 40 % по сравнению с нелегированным сплавом. При этом коэффициент ударно-абразивной износостойкости увеличивается в два раза. В случае абразивного изнашивания наиболее интенсивное увеличение коэффициента износостойкости происходит при увеличении концентрации ванадия в стали до 0,2 %, после чего интенсивность уменьшается. При ударно-абразивном изнашивании увеличение концентрации ва-

надия в сплаве свыше 0,2 % приводит к снижению коэффициента износостойкости на 27 – 35 %. Повышение износостойкости обусловлено формированием карбидов ванадия взамен фосfidной эвтектики и легированного марганцем цементита по границам зерен аустенита, как в случае легирования азотированным феррохромом [19].

Сравнительный анализ зависимостей, представленных на [рис. 1 – 3](#), показал, что для увеличения абразивной износостойкости высокомарганцевую сталь целесообразно легировать азотированной титан-кальциевой лигатурой, обеспечивая остаточное содержание титана в сплаве в пределах от 0,04 до 0,08 %. Для повышения ударно-абразивной износостойкости следует легировать сталь Гадфильда феррованадием. При этом содержание ванадия не должно превышать 0,2 %.

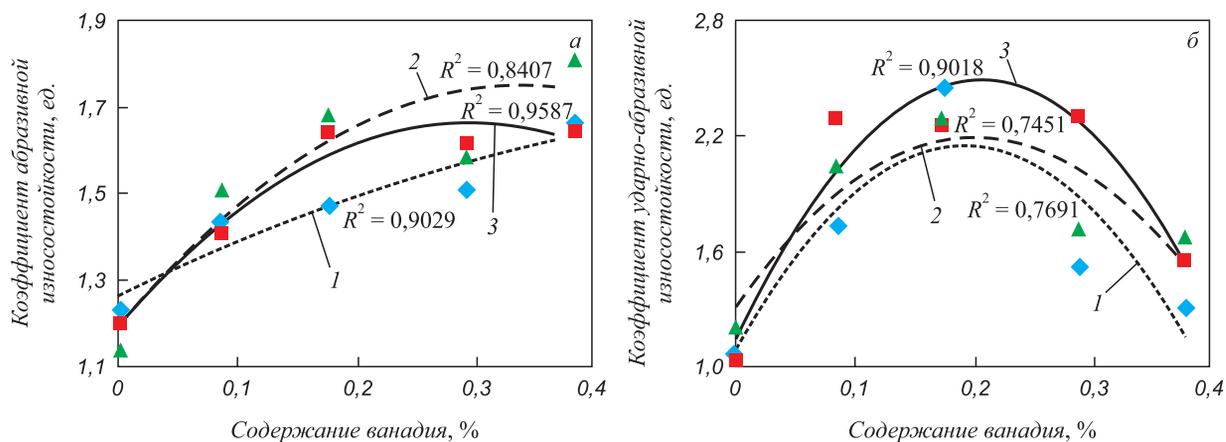


Рис. 3. Влияние микролегирования стали Гадфильда азотированным феррованадием на абразивную (а) и ударно-абразивную (б) износостойкость в зависимости от скорости охлаждения сплава в литейной форме, °C/c:  
1 – 4,5; 2 – 8,9; 3 – 25

Fig. 3. Influence of microalloying of Hadfield steel with nitride ferrovandium on abrasive (a) and impact-abrasive (б) wear resistance depending on cooling rate of the melt in casting mold at °C/s:  
1 – 4.5; 2 – 8.9; 3 – 25

Обязательной технологической операцией при производстве отливок из высокомарганцевой стали является проведение термической обработки с целью растворения эвтектики, выделяющейся по границам зерен в процессе кристаллизации. Традиционно в качестве режима термообработки отливок применяют закалку в воде от температуры 1100 °C, несмотря на легирование и модифицирование сплавов различными элементами. Нагрев осуществляют в печи с окислительной атмосферой, что может приводить к некоторому изменению химического состава сплава.

С целью оценки кинетики фазовых превращений, протекающих при нагреве под закалку отливок из высокомарганцевой стали после легирования различными материалами, провели термический анализ.

На всех полученных кривых дифференциально-сканирующей калориметрии (ДСК) имеется три характерных пика. Первый пик, не зависимо от химического состава стали, находится в пределах 283 – 285 °C, что соответствует выделению карбидов из пересыщенного твердого раствора. Второй и третий пики соответствуют температурам растворения избыточных фаз, которые представлены в [таблице](#).

Пик второго эндотермического эффекта, находящийся в интервале 631 – 752 °C, соответствует растворению легированного цементита. Фосфидная эвтектика растворяется при более высоких температурах (893 – 1006 °C). При этих же температурах заканчивается растворение карбидов легирующих элементов. Поэтому нагрев отливок, изготовленных из легированной высокомарганцевой стали, до температур 945 – 1006 °C обеспечит растворение избыточных фаз в полном объеме.

Путем проведения термогравиметрического анализа установлено, что окисление высокомарганцевой стали начинается при температуре около 500 °C и продолжается до 900 °C. Одновременно с этим протекает процесс обезуглероживания, который начинается в интервале температур 900 – 1000 °C. При более высоких температурах интенсивность процесса обезуглероживания возрастает, что приводит к снижению концентрации углерода в легированных сплавах от 0,04 до 0,14 %. Установлено, что минимальная интенсивность обезуглероживания характерна для сплавов, легированных хромом. Это обусловлено формированием на поверхности образца плотной пленки оксида хрома, снижающей интенсивность поступления кислорода к металлу.

### Результаты ДСК исследований

#### Results of DSC tests

Легирующий материал	Эндотермический эффект, °C					
	второй пик на кривой ДСК			третий пик на кривой ДСК		
	начало	пик	окончание	начало	пик	окончание
Азотированный феррохром	657	703	752	893	925	945
Азотированная титан-кальциевая лигатура	633	713	746	923	968	1006
Азотированный феррованадий	631	707	743	920	964	1005

Сплавы, легированные ванадием, имеют максимальные показатели по обезуглероживанию.

**Выводы.** В процессе исследований установлено, что легирование азотированными ферросплавами приводит к увеличению износостойкости отливок из стали Гадфильда. Для повышения абразивной износостойкости целесообразно применять азотированную титан-кальциевую лигатуру, обеспечивая остаточное содержание титана в составе сплава в пределах от 0,04 до 0,08 %. При этом происходит увеличение коэффициента абразивной износостойкости на 39 – 52 % в зависимости от скорости охлаждения расплава в литейной форме. Повышение ударно-абразивной износостойкости в 2 раза достигнуто при легировании стали Гадфильда азотированным феррованадием. При этом содержание ванадия в сплаве не должно превышать 0,2 %.

Термический анализ позволил установить, что выделение избыточных фаз при нагреве под термическую обработку происходит при температурах 283 – 285 °С. В интервале температур 631 – 752 °С идет растворение легированного цементита, а при температурах 945 – 1006 °С – полное растворение избыточных фаз. Эти температуры могут быть рекомендованы для проведения закалки.

Термогравиметрический анализ показал, что окисление высокомарганцевой стали происходит в интервале температур 500 – 900 °С. При температурах 900 – 1000 °С начинается процесс обезуглероживания, интенсивность которого возрастает при температурах свыше 1000 °С.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Давыдов Н.Г., Блажих Б.М., Бигеев А.М. К вопросу повышения качества отливок из высокомарганцевой стали 110Г13Л. – Томск: ТГУ, 1972. – 139 с.
2. Давыдов Н.Г. Высокомарганцевая сталь. – М.: Металлургия, 1979. – 176 с.
3. Колокольцев В.М., Долгополова Л.Б. Мулякко Н.М. Влияние химического состава на структуру и свойства хромомарганцевых аустенитных сталей // Литейные процессы. 2003. № 3. С. 31 – 36.
4. Сысоев А.М., Бахметьев В.В., Колокольцев В.М. Рафинирование и модифицирование стали 110Г13Л комплексом титан-боркальций // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2008. № 1. С. 43 – 45.
5. Цуркан Д.А., Леонтьев А.Н., Ишков А.В. Повышение конструкционной прочности стали 110Г13Л и литых деталей, используемых в специальных машинах, легированием Mo, Ni и модифицированием РЗМ // Ползуновский вестник. 2012. № 1/1. С. 334 – 336.
6. Nasajpour A., Kokabi A.H., Davami P., Nikzad S. Effect of molybdenum on mechanical and abrasive wear properties of coating of as weld Hadfield steel with flux-cored gas tungsten arc welding // Journal of Alloys and Compounds. 2016. Vol. 659. P. 262 – 269.
7. Вдовин К.Н., Феоктистов Н.А., Горленко Д.А. Выплавка высокомарганцевой стали в дуговой сталеплавильной печи. Внепечная обработка. Сообщение 2 // Изв. вуз. Черная металлургия. 2016. № 1. С. 23 – 28.
8. Тэн Э.Б., Базлова Т.А., Лихолобов Е.Ю. Влияние внепечной обработки на структуру и механические свойства стали 110Г13Л // Металловедение и термическая обработка металлов. 2015. № 3. С. 26 – 28.
9. Тэн Э.Б., Лихолобов Е.Ю. Повышение качества отливок из стали 110Г13Л, обработанной в ковше ферросиликоалюминием и титаном // Литейщик России. 2010. № 10. С. 18 – 21.
10. Mejía I., Bedolla-Jacunde A., Pablo J.R. Sliding wear behavior of a high – Mn austenitic twinning induced plasticity (TWIP) steel microalloyed with Nb // Wear. 2013. Vol. 1 – 2. P. 590 – 597.
11. Abbasi M., Kheirandish S., Kharrazi Y., Hejazi J. The fracture and plastic deformation of aluminum alloyed Hadfield steels // Materials Science and Engineering A. 2009. Vol. 513 – 514. P. 72 – 76.
12. Park K.T., Jin K. G., Han S.H. etc. Stacking fault energy and plastic deformation of fully austenitic high manganese steels: Effect of Al addition // Materials Science and Engineering A. 2010. Vol. 16 – 17. P. 3651 – 3661.
13. Peng X., Zhu D., Hu Z. etc. Stacking fault energy and tensile deformation behavior of high-carbon twinning-induced plasticity steels: Effect of Cu addition // Materials and Design. 2013. Vol. 45. P. 518 – 523.
14. Сильман Г.И. Сплавы системы Fe-C-Mn. Часть 4. Особенности структурообразования в марганцевых и высокомарганцевых сталях // Металловедение и термическая обработка металлов. 2006. № 1. С. 3 – 7.
15. Вдовин К.Н., Горленко Д.А., Никитенко О.А., Феоктистов Н.А. Исследование влияния скорости охлаждения при кристаллизации на размер аустенитного зерна литой стали 110Г13Л // Международный научно-исследовательский журнал. 2015. № 10-2 (41). С. 28 – 31.
16. Чуманов И.В., Порсек М.А. О влиянии химического состава металла на режим термической обработки отливок из стали марки 110Г13Л // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Металлургия. 2012. № 39 (298). С. 59 – 63.
17. Головин Д.Д., Лосинская А.А. Рентгеноструктурный анализ стали Гадфильда после термической обработки и холодной деформации // Сб. тр. Всеросс. науч. студен. конф.: Наука. Технологии. Инновации. Новосибирск: НГТУ, 2012. С. 68 – 71.
18. Новомейский Ю.Д., Лившиц В.И. Свойства и применение высокомарганцевой аустенитной стали. – Томск: Изд-во Томского университета, 1964. – 159 с.
19. Колокольцев В.М., Вдовин К.Н., Чернов В.П. и др. Исследование механических и эксплуатационных свойств высокомарганцевой стали, легированной азотированным феррохромом // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2016. № 3. С. 46 – 54.
20. Вдовин К.Н., Горленко Д.А., Феоктистов Н.А. Исследование влияния скорости охлаждения в интервале выделения избыточных фаз на литую микроструктуру стали Гадфильда // Металлургия: технологии, инновации, качество: Тр. XIX Междунар. науч.-практич. конф., 15 – 16 декабря 2015 г. / Под ред. Е.В. Протопопова. – Новокузнецк: СибГИУ, 2015. С. 125 – 129.

Поступила 25 апреля 2017 г.

### INFLUENCE OF ALLOYING AND THERMAL TREATMENT ON ABRASIVE AND IMPACT-ABRASIVE WEAR RESISTANCE OF CASTINGS PRODUCED FROM HIGH-MANGANESE STEEL

**Abstract.** In the introduction, the authors considered the main factors influencing the wear resistance of high-manganese steel and reviewed the domestic and foreign papers devoted to this problem. A conclusion was made on the basis of these materials and the research goal was set which is quite urgent for the enterprises producing and using parts made of Hadfield steel. Further, materials and research methods were considered. There is description of the materials used for processing of liquid steel, the technology of production of experimental samples from high-manganese steel, chemical composition of the alloy used as the basic one, methods and equipment used for calculation of cooling rate of the melt in the casting mold and for the investigation of wear resistance in terms of abrasive and impact-abrasive wear, equipment for hardening and thermal study. The third part of the paper contains the results of investigation of Hadfield steel alloyed with nitride ferroalloys and with complex addition alloy. The graphs show the dependence of abrasive and impact-abrasive wear resistance coefficients on different alloying schemes of the investigated steel with the selected materials. Besides, one can see how the used alloying elements influence the wear resistance of high-manganese steel under different wear conditions. The concentrations of alloying elements have been found, which provide the maximum value of abrasive and impact-abrasive wear resistance coefficient. The results of the thermal study are also given. The processes were investigated, which develop when castings from Hadfield steel are heated for hardening. The research work made it possible to define temperature ranges for such processes as separation of excess phases, dissolution of alloyed cementite in austenite, complete dissolution of phosphide eutectic and carbides of the alloying elements. Temperature ranges of the steel oxidation and decarburization processes were defined. The final part of the paper contains the conclusions of the investigation work and some recommendations aimed at improving the wear resistance of castings made of high-manganese steel for different operating conditions as well as recommendations on the temperatures of thermal treatment for these products.

**Keywords:** high-manganese steel, nitride ferroalloys, alloying, austenite, wear resistance, excess phase, hardening.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2017-11-904-909

## REFERENCES

- Davydov N.G., Blagikh B.M., Bigeev A.M. *K voprosu povysheniya kachestva otlivok iz vysokomargantsevoi stali 110G13L* [Quality improvement of castings produced from high-manganese steel 110G13L]. Tomsk: TGU, 1972, 139 p. (In Russ.).
- Davydov N.G. *Vysokomargantsevaya stal'* [High-manganese steel]. Moscow: Metallurgiya, 1979, 176 p. (In Russ.).
- Kolokol'tsev V.M., Dolgoplova L.B. Mulyavko N.M. Influence of chemical composition on structure and properties of chromium-manganese austenitic steels. *Liteinye protsessy*. 2003, no. 3, pp. 31–36. (In Russ.).
- Sysoev A.M., Bakhmet'ev V.V., Kolokol'tsev V.M. Refining and inoculation of 110G13L steel with titanium-boron-calcium complex. *Vestnik MGTU im. G.I. Nosova*. 2008, no. 1, pp. 43–45. (In Russ.).
- Tsurkan D.A., Leont'ev A.N., Ishkov A.V. Improvement of structural strength of 110G13L steel and cast parts used in special vehicles by means of alloying with Mo, Ni and inoculation with rare-earth metals. *Polzunovskii Vestnik*. 2012, no. 1/1, pp. 334–336. (In Russ.).
- Nasajpour A., Kokabi A.H., Davami P., Nikzad S. Effect of molybdenum on mechanical and abrasive wear properties of coating of as weld Hadfield steel with flux-cored gas tungsten arc welding. *Journal of Alloys and Compounds*. 2016, vol. 659, pp. 262–269.
- Vdovin K.N., Feoktistov N.A., Gorlenko D.A. High-manganese steel smelting in electric arc furnace. Ladle treatment. Report 2. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2016, no. 1, pp. 23–28. (In Russ.).
- Ten E.B., Bazlova T.A., Likhobolov E.Yu. Effect of out-of-furnace treatment on the structure and mechanical properties of steel 110G13L. *Metal Science and Heat Treatment*. 2015, vol. 57, no. 3-4, pp. 146–150.
- Ten E.B., Likhobolov E.Yu. Improving the quality of castings produced from the 110G13L steel grade treated in the ladle furnace with aluminum ferrosilicon and titanium. *Liteishchik Rossii*. 2010, no. 10, pp. 18–21. (In Russ.).
- Mejia I., Bedolla-Jacuinde A., Pablo J.R. Sliding wear behavior of a high – Mn austenitic twinning induced plasticity (TWIP) steel microalloyed with Nb. *Wear*. 2013, vol. 1-2, pp. 590–597.
- Abbasi M., Kheirandish S., Kharrazi Y., Hejazi J. The fracture and plastic deformation of aluminum alloyed Hadfield steels. *Materials Science and Engineering A*. 2009, vol. 513–514, pp. 72–76.
- Park K.T., Jin K. G., Han S.H., Hwang S.W., Choi K., Lee C.S. Stacking fault energy and plastic deformation of fully austenitic high manganese steels: Effect of Al addition. *Materials Science and Engineering A*. 2010, vol. 16-17, pp. 3651–3661.
- Peng X., Zhu D., Hu Z., Yi W., Liu H., Wang M. Stacking fault energy and tensile deformation behavior of high-carbon twinning-induced plasticity steels: Effect of Cu addition. *Materials and Design*. 2013, vol. 45, pp. 518–523.
- Sil'man G.I. Alloys of the Fe-C-Mn system. Part 4. Special features of structure formation in manganese and high-manganese steels. *Metal Science and Heat Treatment*. 2006, vol. 48, no. 1-2, pp. 3–8.
- Vdovin K.N., Gorlenko D.A., Nikitenko O.A., Feoktistov N.A. Influence of the cooling rate during crystallization on the size of austenitic grain of cast 110G13L steel. *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal*. 2015, no. 10-2 (41), pp. 28–31. (In Russ.).
- Chumanov I.V., Porsek M.A. Influence of chemical composition of metal on thermal treatment mode of castings produced from 110G13L steel. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Metallurgiya*. 2012, no. 39 (298), pp. 59–63. (In Russ.).
- Golovin D.D., Losinskaya A.A. X-ray crystallography of Hadfield steel after thermal treatment and cold deformation. In: *Sbornik trudov Vserossiiskoi nauchnoi studencheskoi konferentsii: Nauka. Tekhnologii. Innovatsii* [Proceedings of All-Russian Sci. Student Conf.: Science. Technology. Innovations]. Novosibirsk: NGTU, 2012, pp. 68–71. (In Russ.).
- Novomeiskii Yu.D., Livshits V.I. *Svoistva i primeneniye vysokomargantsevoi austenitnoi stali* [Properties and application of high-manganese austenitic steel]. Tomsk: izd-vo Tomskogo universiteta, 1964, 159 p. (In Russ.).
- Kolokol'tsev V.M., Vdovin K.N., Chernov V.P., Feoktistov N.A., Gorlenko D.A. Investigation of mechanical and performance characteristics of high-manganese steel alloyed with nitride ferrochromium. *Vestnik MGTU im. G.I. Nosova*. 2016, no. 3, pp. 46–54. (In Russ.).
- Vdovin K.N., Gorlenko D.A., Feoktistov N.A. Influence of the cooling rate in the range of excess phase separation on cast microstructure of Hadfield steel. In: *Metallurgiya: tekhnologii, innovatsii, kachestvo: trudy XIX Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, 15–16 dekabrya 2015 g.* [Metallurgy: Technologies, Innovations, Quality: Proceedings of 19th Int. Sci.-Pract. Conf., December 15-16, 2015]. Protopopov E.V. ed. Novokuznetsk: SibGIU, 2015, pp. 125-129. (In Russ.).

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

## Information about the authors:

**K.N. Vdovin**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Chair “Technology of Metallurgy and Foundry Processes” ([kn\\_vdovin@gmail.com](mailto:kn_vdovin@gmail.com))  
**N.A. Feoktistov**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Technology of Metallurgy and Foundry Processes”

**D.A. Gorlenko**, Cand. Sci. (Eng.), Senior Lecturer of the Chair “Technology of Metallurgy and Foundry Processes”

**V.P. Chernov**, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Technology of Metallurgy and Foundry Processes”

**I.B. Khrenov**, MA Student of the Chair “Technology of Metallurgy and Foundry Processes”

Received April 25, 2017