

УДК 621.74

## МОДИФИЦИРОВАНИЕ ОТЛИВОК ИЗ ВЫСОКОМАРГАНЦЕВОЙ СТАЛИ КАРБОНИТРИДОМ ТИТАНА\*

**Вдовин К.Н.**, д.т.н., профессор, зав. кафедрой технологий металлургии

и литейных процессов (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

**Никитенко О.А.**, к.т.н., инженер-исследователь, научный сотрудник

научно-исследовательского сектора

**Хамидулина Д.Д.**, к.т.н., доцент кафедры строительного производства

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

**Аннотация.** Статья посвящена изучению процесса внутриформенного модифицирования отливок из высокомарганцевой стали карбонитридом титана. Во введении рассмотрены основные принципы легирования и модифицирования литейных сплавов, а также приведен обзор результатов работ по этой тематике, выполненных отечественными и зарубежными исследователями. По представленным материалам сделаны выводы, сформулированы цели и задачи для исследований. Обоснована актуальность проводимых исследований, а также практическая значимость для литейных предприятий. Во второй части описана методика проведения экспериментов. Подробно рассмотрены материалы, которые были задействованы при проведении экспериментальных работ: шихтовые материалы, модификатор, материалы для изготовления литейных форм. Описан способ получения экспериментальных отливок, метод определения тепловых условий формирования экспериментальных образцов в литейной форме, режим термической обработки. Наряду с этим, рассмотрена методика проведения металлографических исследований. В третьей части приведены результаты, полученные в ходе проведения экспериментальных работ по внутриформенному модифицированию мелкодисперсным порошком карбонитрида титана отливок из высокомарганцевой стали. Рассмотрено влияние модифицирования на уровень эксплуатационных свойств, выраженных через коэффициенты абразивной и ударно-абразивной износостойкости, а также проведена оценка изменения указанных свойств относительно немодифицированного сплава. Приведены результаты металлографических исследований, позволившие обосновать изменение уровня эксплуатационных свойств высокомарганцевой стали. Рассмотрено влияние тепловых условий формирования литых изделий, в частности скорости охлаждения сплава в литейной форме, на уровень эксплуатационных свойств модифицированной высокомарганцевой стали. В заключительной части сформулированы выводы по результатам проведенных исследований, а также даны технологические рекомендации для практической реализации результатов работ с целью повышения уровня эксплуатационных свойств литых изделий из высокомарганцевой стали. Кроме того, даны рекомендации по наиболее рациональному расходу порошка карбонитрида титана, обеспечивающего получение необходимых характеристик микроструктуры и, как следствие этого, повышенного уровня эксплуатационных свойств.

**Ключевые слова:** высокомарганцевая сталь, аустенит, карбонитрид титана, модифицирование, скорость охлаждения, износостойкость, закалка.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-3-188-194

### ВВЕДЕНИЕ

Сталь Гадфильда обладает способностью упрочняться под действием внешнего физического воздействия, благодаря чему изделия, изготовленные из этой стали, имеют высокий уровень эксплуатационных свойств в различных условиях изнашивания. Микроструктура высокомарганцевой стали, имеющей классический химический состав, в закаленном состоянии представлена аустенитом. При ее дополнительном легировании возможно присутствие в составе стали отдельных карбидов.

С целью повышения эксплуатационных показателей изделий, изготовленных из стали Гадфильда, ее допол-

нительно легируют и модифицируют по отдельности или в комплексе такими элементами, как хром, ванадий, титан, редкоземельные металлы и др. [1 – 6].

Классическая технология легирования (модифицирования) предполагает введение лигатуры или модификатора в расплав, находящийся в печи или ковше. Это неизбежно приводит к повышенному угару высокоактивных элементов, например титана и ванадия.

С целью снижения расхода модификаторов и лигатур на практике реализуют различные способы их введения:

- в виде кусков определенной фракции в ковш;
- при помощи порошковой проволоки [7, 8];
- выстреливанием пулями или гранулами [9];
- утапливаемыми блоками;

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

- методом продувки порошковыми материалами [9, 10];
- внутриформенным модифицированием различными материалами [11 – 13].

С позиции сокращения угара дорогостоящих легирующих элементов и повышения эффективности всего процесса в целом, наиболее перспективной является технология внутриформенного модифицирования высокомарганцевой стали мелкодисперсным порошком карбонитрида титана [14 – 17]. Следовательно, исследование процесса внутриформенного модифицирования высокомарганцевой стали порошком карбонитрида титана, а также разработка технологических рекомендаций для его эффективной реализации являются актуальными задачами для литейного производства. Полученные результаты могут быть полезны промышленным предприятиям, выпускающим продукцию из высокомарганцевой стали, которая работает в условиях интенсивного изнашивания.

Цель работы – исследование процесса внутриформенного модифицирования отливок из высокомарганцевой стали мелкодисперсным порошком карбонитрида титана.

Для достижения поставленной цели проведены лабораторные эксперименты по внутриформенному модифицированию отливок из стали Гадфильда мелкодисперсным порошком карбонитрида титана, изучены микроструктура и эксплуатационные свойства полученных сплавов.

#### МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования проводили на литых экспериментальных образцах размером 35×35×10 мм, имеющих базовый (до модифицирования) химический состав, регламентированный ГОСТ 977-88.

Экспериментальные сплавы выплавляли в индукционной печи ИСТ-006 с основной футеровкой. Химический состав образцов определяли на спектрометре фирмы SPECTRO, модель MAXx.

С целью получения различных скоростей охлаждения в температурных интервалах кристаллизации и выделения вторичных фаз экспериментальные сплавы заливали в литейные формы с разными теплоаккумулирующими способностями: сухая и сырая песчано-глинистые форма, кокиль. Изменение температуры залитого металла во времени регистрировали с помощью вольфрам-рениевой термопары и аналого-цифрового преобразователя LA-50USB. Скорость охлаждения сплава в температурных интервалах первичной и вторичной кристаллизации определяли по кривой, построенной в координатах «температура – время».

Базовый состав высокомарганцевой стали модифицировали внутри литейной формы карбонитридом титана с преимущественным размером частиц 6 мкм. Порошок модификатора, имеющего определенную массу

по отношению к массе заливаемого расплава, располагали в питателях литейной формы.

Термическую обработку экспериментальных отливок осуществляли в нагревательной печи сопротивления НАКАЛ. После нагрева и гомогенизирующей выдержки проводили закалку экспериментальных отливок в воде от температуры 1100 °С.

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

Определение размера зерен и количественный анализ микроструктуры проводили на оптическом микроскопе Axio Observer с помощью программы Ticsomet Standart Pro по ГОСТ 5639-82. Для микроанализа из образца по стандартной методике были приготовлены микрошлифы путем запрессовки образцов в смолу Transoptic на автоматическом прессе Simplimet 1000 на линии пробоподготовки фирмы Buechler. Для выявления микроструктуры поверхность шлифов подвергали травлению в смеси концентрированных азотной и соляной кислот (65 % HNO<sub>3</sub>, 35 % HCl) методом погружения полированной поверхности в ванну с реактивом (исследования выполнены в ЦКП НИИ Наносталей ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»).

#### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Модифицирование высокомарганцевой стали карбонитридом титана осуществляли внутри литейной формы. Для этого порошок карбонитрида титана засыпали на питатели в количестве до 0,7 % от массы заливаемого расплава. Для заливки экспериментальных образцов к отливке подвели два питателя, имеющих сечение трапеции. Порошок размещали вдоль питателя, по всей длине равномерным слоем. Это позволило засыпать в форму достаточно большое количество модификатора.

В результате испытаний экспериментальных отливок, изготовленных из модифицированной высокомарганцевой стали, установлено, что наибольшего увеличения эксплуатационных свойств, в частности абразивной и ударно-абразивной износостойкости отливок из высокомарганцевой стали, удалось достичь при расходе модификатора 0,3 – 0,4 %. При этом максимальное увеличение эксплуатационных свойств экспериментальных сплавов относительно базового, количественно выраженное через соответствующие коэффициенты износостойкости, составило 20,0 – 27,5 % для абразивной и в 3 – 4 раза для ударно-абразивной износостойкости (рис. 1). Влияние тепловых условий формирования литой детали, реализующееся через скорость охлаждения расплава в литейной форме и оказывающее влияние на первичную литую структуру, проявляется следующим образом: чем выше скорость охлаждения расплава в ли-

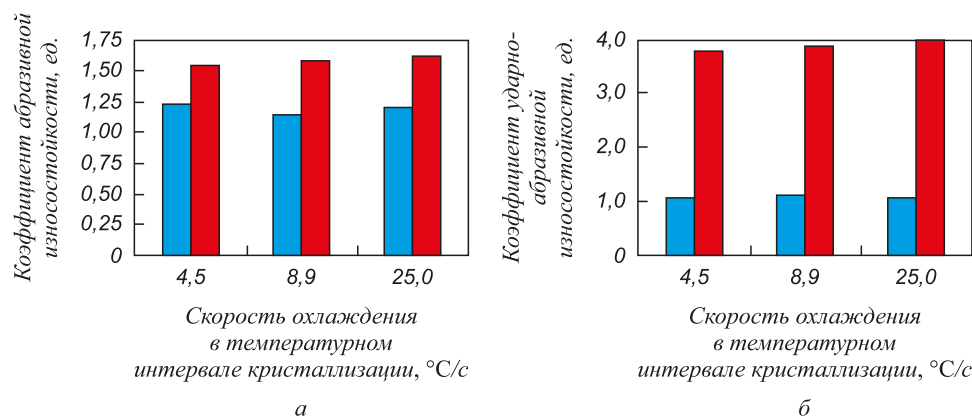


Рис. 1. Гистограммы сравнения коэффициентов износостойкости отливок из высокомарганцевой стали базового (■) и модифицированного (■) составов, закристаллизовавшихся при различных скоростях охлаждения сплава в литейной форме: а – коэффициент абразивной износостойкости; б – коэффициент ударно-абразивной износостойкости

Fig. 1. Comparison histograms of wear resistance coefficients of high manganese steel castings of basic (■) and inoculated (■) compositions, which crystallized at various alloy cooling rates in the foundry mold: а – coefficient of abrasive wear resistance; б – coefficient of abrasive strike wear resistance index

тейной форме в процессе кристаллизации, тем выше коэффициенты износостойкости закаленного сплава [18 – 21]. Для абразивной износостойкости разница в значениях коэффициентов не превышает 5 %, а для ударно-абразивной составляет 9 – 12 %.

Модифицирование высокомарганцевой стали карбонитридом титана в первую очередь влияет на размер зерна аустенита, а также количество вторичной фазы. Для оценки этого влияния выполнены металлографические исследования полученных экспериментальных отливок в закаленном состоянии (рис. 2). Кроме того, проведена оценка влияния тепловых условий формирования литых изделий, а именно, скорости охлаждения расплава в литейной форме на указанные характеристики. Этот фактор оказывает влияние на параметры микроструктуры в литом состоянии изделий. После проведения

термической обработки количественные параметры микроструктуры (например, размер зерна аустенита) изменяются, но конечные характеристики будут напрямую определяться исходными. Именно по этой причине на рис. 2 указаны скорости охлаждения, при которых формировались исходные микроструктуры экспериментальных отливок.

Установлено, что наименьший размер зерна аустенита наблюдается в отливках, расплав которых модифицирован карбонитридом титана в количестве от 0,3 до 0,4 % от массы литого изделия. Эта тенденция проявляется независимо от скорости охлаждения расплава в литейной форме. Превышение верхнего значения указанного диапазона приводит к увеличению среднего размера зерна аустенита. Это отчетливо видно на рис. 3, где представлены фотографии микроструктуры немо-

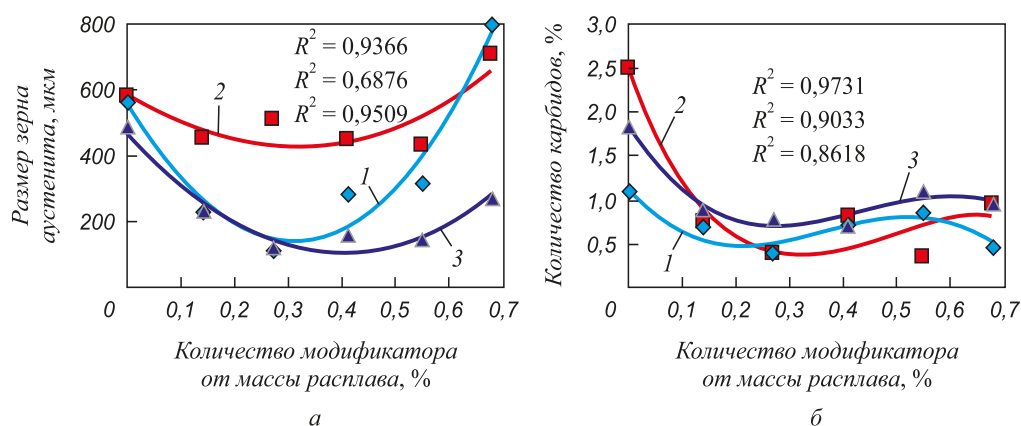


Рис. 2. Влияние карбонитрида титана на размер зерна аустенита (а) и количество карбидов после термической обработки (б) при скорости охлаждения сплава в температурном интервале кристаллизации, °C/s: 1 – 4,5; 2 – 8,9; 3 – 25,0

Fig. 2. Influence of titanium carbonitride on austenite grain size and quantity of carbides after thermal treatment: alloy cooling rate in the solidification range at °C/s: 1 – 4.5; 2 – 8.9; 3 – 25.0

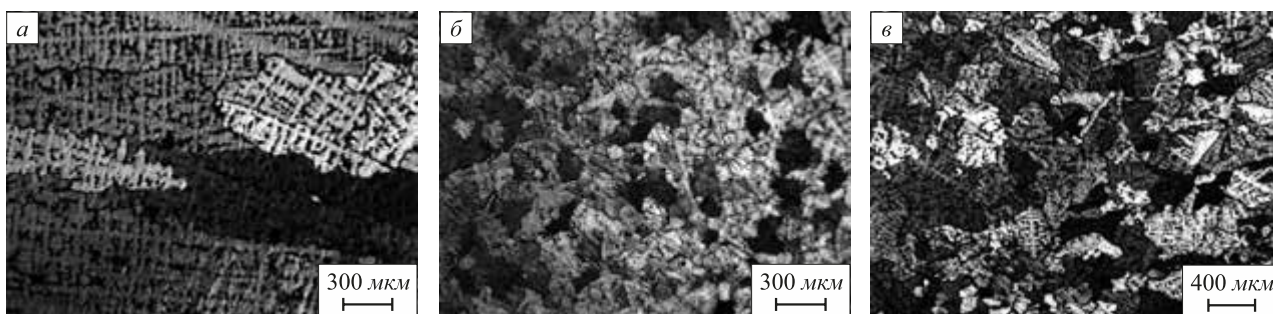


Рис. 3. Микроструктура высокомарганцевой стали с различным содержанием карбонитрида титана:  
 а – без модификатора; б – 0,4 % (по массе); в – 0,68 % (по массе). Скорость охлаждения 4,5 °C/с, ×50

Fig. 3. Microstructure of high manganese steel with various quantity of titanium carbonitride:  
 а – without treating agent; б – 0.4 mass. %; в – 0.68 mass. %. Cooling speed 4.5 °C/s, magnification ×50

дифицированного сплава, а также сплава с содержанием модификатора 0,40 – 0,68 %.

Также следует отметить, что в процессе термической обработки наблюдался рост зерна аустенита на 20 % в случае формирования литой структуры при скоростях охлаждения в интервале кристаллизации 4,5 и 25,0 °C/с, а также содержания модификатора 0,3 – 0,4 % от массы расплава. При промежуточной скорости охлаждения (8,9 °C/с) наблюдался рост зерна на 50 – 65 %, при этом минимальный прирост был для сплавов, модифицированных карбонитридом титана в количестве 0,3 – 0,4 % от массы литого изделия.

Количество карбидной фазы для всех экспериментальных отливок находится в пределах от 0,36 до 1,1 % в зависимости от тепловых условий, при которых про-

исходило формирование литой структуры в процессе кристаллизации сплава. Следует отметить, что если сравнивать с базовым (немодифицированным) сплавом, находящимся в закаленном состоянии, то при введении в расплав более 0,2 % карбонитрида титана происходит снижение количества карбидов на 58 – 83 % в зависимости от содержания вторичной фазы в первичной литой структуре. Фотографии включений избыточной фазы, встречающихся в высокомарганцевой стали после термической обработки, представлены на рис. 4.

Уменьшение количества карбидной фазы, связанной с введением в расплав мелкодисперсного порошка карбонитрида титана, приводит к увеличению степени легированности твердого раствора. Это сказывается на изменении микротвердости аустенита. В ходе прове-

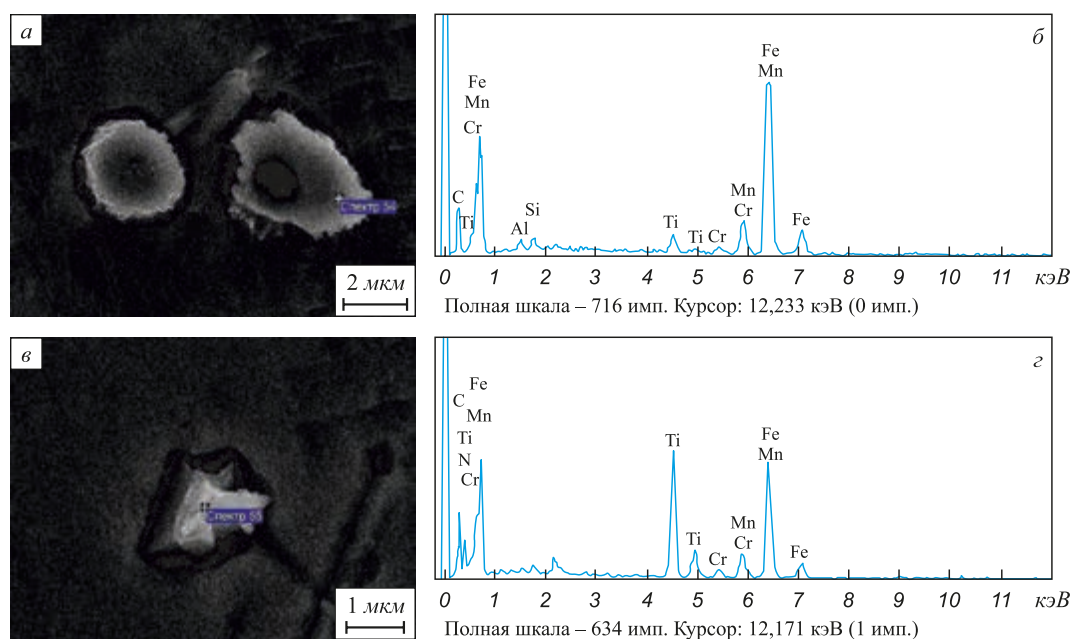


Рис. 4. Фотографии включений (а, в) и энергодисперсионные спектры (б, з), присутствующие в микроструктуре высокомарганцевой стали:  
 а – карбид; в – карбонитрид

Fig. 4. Photos of inclusions (а, в) and energy-dispersive spectra (б, з) microstructure of high manganese steel:  
 а – carbide; в – carbonitride



денных исследований установлено, что при увеличении количества введенного модификатора до 0,2 % от массы расплава происходит повышение среднего значения микротвердости аустенита на 12 – 18 % от первоначального значения, что в натуральную величину составляет 2500 – 2700 МПа. Дальнейшее повышение количества вводимого модификатора практически не приводит к изменению среднего значения микротвердости.

Влияние карбонитрида титана на твердость экспериментальных отливок не выявлено. Среднее значение твердости термообработанной высокомарганцевой стали находилось в пределах 91 – 95 НВ независимо от тепловых условий формирования литой детали.

## Выводы

Установлено, что модифицирование высокомарганцевой стали внутри литейной формы мелкодисперсным порошком карбонитрида титана приводит к повышению коэффициента абразивной износостойкости на 20 – 25 %, а ударно-абразивной в 3 – 4 раза. Для обеспечения высокого уровня эксплуатационных свойств необходимо вводить в расплав высокомарганцевой стали порошок модификатора в количестве 0,3 – 0,4 % от массы заливаемого в форму сплава.

Модифицирование расплава высокомарганцевой стали карбонитридом титана способствует измельчению размера зерна аустенита до значений 110 – 120 мкм при определенных тепловых условиях формирования литой детали. После термической обработки средний размер зерна увеличивается не более, чем на 20 % в случае формирования микроструктуры в процессе первичной кристаллизации со скоростями 4,5 и 25,0 °C/с, и на 50 – 65 % для скорости охлаждения 8,9 °C/с.

В результате исследования карбидной фазы установлено, что ее количество в экспериментальных сплавах не превышает 1,1 %. Содержание карбидов снижается на 58 – 83 % относительно базового немодифицированного сплава при введении в расплав карбонитрида в количестве не менее 0,2 % от массы заливаемого металла.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Matti Lindroos, Marian Apostol, Vuokko Heino etc. The deformation, strain hardening, and wear behavior of chromium-alloyed Hadfield steel in abrasive and impact conditions // *Tribology Letters*. 2015. Vol. 57. No. 3. Article 24.
2. Xing Tian, Hong Li, Yansheng Zhang. Effect of Al content on stacking fault energy in austenitic Fe–Mn–Al–C alloys // *Journal of Materials Science*. 2008. Vol. 43. No. 18. P. 6214 – 6222.
3. Majid Abbasi, Shahram Kheirandish, Yosef Kharrazi, Jalal Hejazi. The fracture and plastic deformation of aluminum alloyed Hadfield steels // *Materials Science and Engineering: A*. 2009. July. Vols. 513 – 514. P. 72 – 76.
4. 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. April – May. Vol. 301. No. 1 – 2. P. 590 – 597.
5. 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. 65. P. 262 – 269.
6. Qichuan J., Zhenming H., Donghuan C. etc. Abrasion-resistant as-cast manganese steel with nodular carbide modified by calcium // *Journal of Materials Science Letters*. 1990. May. Vol. 9. No. 5. P. 616 – 617.
7. Кудрин В.А., Шишимиров В.А. Металлургия стали: Учеб. пособие. – М.: МГВМИ, 2003. – 254 с.
8. Методы ввода модификаторов в металлический расплав / В.И. Жучков, О.Ю. Шешуков, Е.Ю. Лозовая и др. ГУ ИМЕТ УрО РАН, ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2008. – 6 с.
9. Жучков В.И., Шешуков О.Ю., Лозовая Е.Ю., Маршук Л.А. Современные методы ввода модификаторов в расплавы чугуна и стали // Сб. докл. Литейного консилиума № 1 «Модифицирование как эффективный метод повышения качества чугунов и сталей». – Челябинск: Челябинский Дом печати, 2006. – 52 с.
10. Сидоренко М.И. Теория и практика продувки металла порошками. – М.: Металлургия, 1973. – 304 с.
11. Фесенко М.А., Фесенко А.Н. Перспективные направления использования метода внутриформенного модифицирования расплава для изготовления отливок с заданными эксплуатационными свойствами // *Литье и металлургия*. 2013. № 4 (73). С. 35 – 41.
12. Чайковский А.А., Хасан О.С., Ольшевский В.С. Получение двухслойных отливок методом внутриформенного модифицирования // *Новые материалы и технологии в машиностроении*. 2009. № 9. С. 101 – 104.
13. Баранов Е.М. Внутриформенное модифицирование цирконием серого чугуна и литой стали путем воздействия НЭМИ // *Вестник института тяги и подвижного состава*. 2015. № 11. С. 77 – 79.
14. Аникеев А.Н., Бигеев А.В., Гордеев Е.Н. и др. О возможности введения твердых тугоплавких частиц при получении трубной заготовки методом центробежного литья // *Вестник ЮУрГУ*. 2009. № 36. С. 24 – 27.
15. Миннеханов Г.Н., Шуйкин О.А., Миннеханов Р.Г. Влияние модифицирования наночастицами карбонитрида титана и легирования титаном на структуру и свойства доэвтектических чугунов // *Омский научный вестник*. 2009. № 1. С. 22 – 25.
16. Чуманов В.И., Пятагин Д.А., Чуманов И.В. Упрочнение стали тугоплавкой дисперсной фазой // *Вестник МГТУ им. Г.И. Носова*. 2007. № 4. С. 49 – 53.
17. Аникеев А.Н., Чуманов И.В., Седухин В.В. и др. Исследование влияния отжига на концентрацию дисперсных частиц в объеме дисперсно-упрочненных металлических материалов // VI Всероссийская конференция по наноматериалам с элементами научной школы для молодежи. Москва. 22 – 25 ноября 2016 г.: Сборник материалов. – М.: ИМЕТ РАН, 2016. С. 344 – 346.
18. Вдовин К.Н., Горленко Д.А., Феоктистов Н.А. Исследование влияния скорости охлаждения в интервале выделения избыточных фаз на литую микроструктуру стали Гадфильда // Сб. тр. XIX Междунар. науч.-практич. конф. «Металлургия: технология, инновация, качество» / Под ред. Е.В. Протопопова. – Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ, 2015. С. 125 – 129.
19. Вдовин К.Н., Феоктистов Н.А., Горленко Д.А. и др. Изучение влияния скорости охлаждения на механические и эксплуатационные свойства стали 110Г13Л // *Литейщик России*. 2015. № 12. С. 23 – 24.
20. Вдовин К.Н., Горленко Д.А., Феоктистов Н.А. Влияние энергии дефекта упаковки на абразивную износостойкость отливок из стали Fe – 12Mn – 1,2C, охлажденных с различными скоростями // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2016. Т. 59. № 9. С. 603 – 609.
21. 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.

Поступила в редакцию 14 июня 2018 г.

После доработки 26 июля 2018 г.

Принята к публикации 29 января 2019 г.

## INOCULATION OF HIGH MANGANESE STEEL CASTINGS USING TITANIUM CARBONITRIDE

K.N. Vdovin, N.A. Feoktistov, D.A. Gorlenko, O.A. Nikitenko, D.D. Khamidulina

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Chelyabinsk Region, Russia

**Abstract.** The article is devoted to study of the process of mold inoculation of high manganese steel castings using titanium carbonitride. Introduction considers basic principles, alloying and inoculation of casting alloys. Review of the papers on this topic made by native and foreign researchers was given. Conclusions were made on the materials presented in the studied papers, goals and tasks for studies were formed. Besides, in this part of the article relevance of the conducted researches was substantiated as well as practical significance for casters. The second part of the article describes routine of experiments. Materials involved when conducting experimental works were considered in details: charge materials, treatment agent, materials for foundry molds. Besides, there are also described the way to receive experimental cast products, methodology to determine thermal conditions for forming experimental models in foundry mold and regimen of thermal treatment. Herewith, methodology for conducting metallographical test was considered. The third part of the article mentions the results received during carrying out experimental works on mold inoculation using fine titanium carbonitride powder of high manganese steel castings. Influence of inoculation on the level of performance properties expressed via coefficients of abrasive wear and wear striking resistance was considered as well as change of the indicated peculiarities in relation to not inoculated alloy was evaluated. Besides, results of metallographical tests were given which allowed to substantiate change of the performance properties level of high manganese steel. Influence of thermal conditions of forming cast products was also evaluated, in particular speed of alloy cooling in foundry mold on the level of performance properties of inoculated high manganese steel. In final part of the article conclusions on the results of conducted researches were made as well as manufacturing recommendations were given for practical implementation of the work results to increase the level of performance properties of high manganese steel. Besides, recommendations on the most reasonable expenditure of titanium carbonitride powder ensuring receipt of the necessary characteristics of microstructure and as a consequence, increase of the level of performance properties were given.

**Keywords:** high manganese steel, austenite, titanium carbonitride, inoculation, cooling speed, wear resistance, hardening.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-3-188-194

## REFERENCES

1. Matti Lindroos, Marian Apostol, Vuokko Heino, Kati Valtonen, Anssi Laukkanen, Kenneth Holmberg, Veli-Tapani Kuokkala. The deformation, strain hardening, and wear behavior of chromium-alloyed Hadfield steel in abrasive and impact conditions. *Tribology Letters*. 2015, vol. 57, no. 3, article 24.
2. Xing Tian, Hong Li, Yansheng Zhang. Effect of Al content on stacking fault energy in austenitic Fe–Mn–Al–C alloys. *Journal of Materials Science*. 2008, vol. 43, no. 18, pp. 6214–6222.
3. Majid Abbasi, Shahram Kheirandish, Yosef Kharrazi, Jalal Hejazi. The fracture and plastic deformation of aluminum alloyed Hadfield steels. *Materials Science and Engineering: A*. 2009, July, vols. 513–514, pp. 72–76.
4. 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. 301, Issues 1–2, pp. 590–597.
5. 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.
6. Qichuan J., Zhenming H., Donghuan C., Shoushi W., Jiulin Y. Abrasion-resistant as-cast manganese steel with nodular carbide modified by calcium. *Journal of Materials Science Letters*. 1990, May, vol. 9, no. 5, pp. 616–617.
7. Kudrin V.A., Shishimirov V.A. *Metallurgiya stali: ucheb. posobie* [Steel metallurgy: Tutorial]. Moscow: MGVI, 2003, 254 p. (In Russ.).
8. Zhuchkov V.I., Sheshukov O.Yu., Lozovaya E.Yu. etc. *Metody vvedeniya modifikatorov v metallicheskie rasplavy* [Methods for introducing treating agents into metallic melt]. IMET UrO RAN, UGTU-UIP, 2008, 6 p. (In Russ.).
9. Zhuchkov V.I., Sheshukov O.Yu., Lozovaya E.Yu., Marshuk L.A. Modern methods of treating agent introduction into cast iron and steel melts. In: *Sb. dokladov Liteinogo konsiliuma no. 1 "Modifikatsirovanie kak effektivnyi metod povysheniya kachestva chugunov i stalei"* [Coll. of papers of the Foundry Council No. 1 "Inoculation as an Effective Method for Improving Quality of Cast Iron and Steel"]. Chelyabinsk: Chelyabinskii Dom pečati, 2006, 52 p. (In Russ.).
10. Sidorenko M.I. *Teoriya i praktika proizvodki metalla poroshkami* [Theory and practice of metal blowing with powders]. Moscow: Metallurgiya, 1973, 304 p. (In Russ.).
11. Fesenko M.A., Fesenko A.N. Perspective directions of using the method of mold inoculation of melt for making castings with specified performance properties. *Lit'e i metallurgiya*. 2013, vol. 73, no. 4, pp. 35–41. (In Russ.).
12. Chaikovskii A.A., Khasan O.S., Ol'shevskii V.S. Production of two-layer castings using the method of inoculation. *Novye materialy i tekhnologii v mashinostroenii*. 2009, no. 9, pp. 101–104. (In Russ.).
13. Baranov E.M. Mold inoculation of zirconium of gray cast iron and cast steel affected by NEMI. *Vestnik instituta tyagi i podvizhnogo sostava*. 2015, no. 11, pp. 77–79. (In Russ.).
14. Anikeev A.N., Bigeev A.V., Gordeev E.N., Chumanov V.I., Chumanov I.V. On possibility of introducing solid refractory particles in production of tube billets using the method of centrifugal casting. *Vestnik YuUrGU*. 2009, no. 36, pp. 24–27. (In Russ.).
15. Minnekhanov G.N., Shuikin O.A., Minnekhanov R.G. Effect of titanium carbonitride inoculation using nanoparticles and titanium doping on the structure and properties of pre-eutectic cast irons. *Omskii nauchnyi vestnik*. 2009, no. 1, pp. 22–25. (In Russ.).
16. Chumanov V.I., Pyatygin D.A., Chumanov I.V. Steel hardening using refractory disperse phase. *Vestnik MGTU im. G.I. Nosova*. 2007, no. 4, pp. 49–53. (In Russ.).
17. Anikeev A.N., Chumanov I.V., Sedukhin V.V., Arsent'eva A.S., Ladygin S.Yu. Investigation of influence of annealing on concentration of dispersed particles in volume of dispersed-hardened metallic materials. In: *VI Vserossiiskaya konferentsiya po nanomaterialam s elementami nauchnoi shkoly dlya molodezhi*. Moskva. 22 – 25 noyabrya 2016 g.: *Sbornik materialov* [VI All-Russ. Conf. on Nanomaterials with Elements of a Sci. School for Young People. Moscow. November 22–25, 2016: Coll. of materials]. Moscow: IMET RAN, 2016, pp. 344–346. (In Russ.).
18. Vdovin K.N., Gorlenko D.A., Feoktistov N.A. Investigation of influence of cooling rate in interval of excess phases separation on the cast microstructure of Hadfield steel. In: *Sbornik trudov XIX mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Metallurgiya: tekhnologiya, innovatsiya, kachestvo"* [Cool. Of papers of XIX Int. Sci.-Pract. "Metallurgy: technologies, innovations, quality"]. Protopopov E.V. ed. Novokuznetsk: Izd. tsentr SibGIU, 2015, pp. 125–129. (In Russ.).

19. Vdovin K.N., Feoktistov N.A., Gorlenko D.A., Khrenov I.B., Deryabin D.A. Study of the influence of cooling rate on the mechanical and performance properties of 110G13L steel. *Liteishchik Rossii*. 2015, no. 12, pp. 23–24. (In Russ.).
20. Vdovin K.N., Gorlenko D.A., Feoktistov N.A. Influence of stacking-fault energy on abrasive wear resistance of castings from Fe-12Mn-1,2C steel cooled with different rates. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2016, vol. 59, no. 9, pp. 603–609. (In Russ.).
21. Kolokol'tsev V.M., Vdovin K.N., Chernov V.P., Feoktistov N.A., Gorlenko D.A. Investigation of mechanical and performance properties of high manganese steel alloyed with nitrogenous ferrochrome. *Vestnik MGTU im. G.I. Nosova*. 2016, no. 3, pp. 46–54. (In Russ.).

**Funding.** The research was financially supported by the Russian Sci. 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)

**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”

**O.A. Nikitenko**, Cand. Sci. (Eng.), Research Engineer, Research Associate of Scientific Research Sector

**D.D. Khamidulina**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair of Construction Industry

Received June 14, 2018

Revised July 26, 2018

Accepted January 29, 2018

---