

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

УДК 669.15

DOI:10.18503/1995-2732-2016-14-3-46-54

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.

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

Аннотация

Актуальность работы: увеличение срока службы литых деталей из высокомарганцевой стали, эксплуатирующихся в условиях абразивного и ударно-абразивного изнашивания, является актуальной задачей для литейного производства. В настоящее время существует множество предложений по материалам, легирование сплавов которыми может привести к увеличению механических и эксплуатационных свойств. Применение в промышленности этих материалов ограничено из-за отсутствия практических данных по влиянию предлагаемых материалов на эксплуатационные и другие потребительские свойства выпускаемой продукции. **Целью работы** является изучение влияния азотированного феррохрома на износостойкость высокомарганцевой стали, а также изучение микроструктуры поверхности изнашивания при различном содержании хрома в химическом составе стали. **Используемые методы:** для решения поставленной задачи проводили лабораторные эксперименты, металлографические исследования, а также определение механических и эксплуатационных свойств экспериментальных сплавов по гостированным методикам. **Полученные результаты:** представлены результаты комплексных исследований высокомарганцевой стали, легированной азотированным феррохромом. Показано влияние содержания хрома и скорости охлаждения сплава на формирование литой структуры, механических и эксплуатационных свойств исследуемой высокомарганцевой стали. Определено рациональное содержания хрома в химическом составе стали, при котором сплав обладает максимальной величиной коэффициента износостойкости в литом состоянии и после термической обработки. Представлено влияние азотированного феррохрома и скорости охлаждения сплава на коэффициент анизотропии зерна аустенита. Рассмотрено несколько вариантов изнашивания аустенитной матрицы при наличии в ней карбидов хрома, а также влияние хрома на микротвёрдость аустенитной матрицы. Полученные результаты исследований могут быть полезны при выборе состава высокомарганцевой стали с целью повышению эксплуатационных свойств.

Ключевые слова: высокомарганцевая сталь, азотированный феррохром, скорость охлаждения, коэффициент износостойкости, микроструктура, микротвёрдость.

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

Введение

Прочностные, пластические и эксплуатационные свойства отливок из высокомарганцевой стали 110Г13Л зависят от многих факторов: химического состава стали, типа литейной формы, скорости охлаждения при формировании отливки, массы, толщины стенки и габари-

тов отливки и пр., что широко освещено в научно-технической литературе.

В источнике [1] представлены результаты исследования влияния основных элементов, входящих в химический состав высокомарганцевой стали, на твёрдость и ударную вязкость. Авторами статьи установлено, что по степени уменьшения влияния на свойства стали элементы можно расположить в следующий ряд: Si-Mn-Al-P-S-Cr. Основное внимание уделено исследованию влиянию углерода, кремния, марганца и

© Колокольцев В.М., Вдовин К.Н., Чернов В.П., Феоктистов Н.А., Горленко Д.А., 2016

алюминия на значение твёрдости и ударной вязкости исследуемой стали. Представленные экспериментальные данные хорошо коррелируют с данными источников [2, 3].

В работе [4] изложены результаты исследований, направленных на установление влияния раскисляюще-легирующе-модифицирующего комплекса, включающего в себя титан, ванадий и кальций, на твёрдость, предел прочности, ударную вязкость высокомарганцевой стали. Отмечено, что максимальные значения этих свойств наблюдаются при содержании ванадия и титана в пределах 0,18–0,26% каждого.

Довольно много работ посвящено изучению свойств стали Гадфильда после модифицирования её кальцием и редкоземельными металлами [5–7]. Отмечено, что при увеличении добавки карбоната до 0,8 мас. % снижается величина переохлаждения с 40 до 10°C, уменьшается типоразмер карбидов с 18–145 до 5–15 мкм и их количество, а также измельчается зерно до 3–4 балла. Значение ударной вязкости увеличивается на 35–40%.

В работе [8] представлены результаты по комплексному легированию этой стали титаном, бором, кальцием, приводящему к увеличению коэффициента износостойкости на 20%, уменьшению размера зерна аустенита и количества неметаллических включений, а также размера вторичных карбидов.

Среди всего разнообразия легирующих элементов и комплексных лигатур, применяющихся для обработки жидкой высокомарганцевой стали, особое место занимает хром.

В работе [4] говорится о положительном влиянии хрома на температуру мартенситного превращения по сравнению с марганцем. По мнению авторов этой работы, важно иметь отношение хрома к углероду в пределах 4–8, обеспечивающее хорошую износостойкость благодаря наличию в микроструктуре карбидов (Fe, Cr)₇C₃. Кроме того, авторами этой работы установлено, что максимальное значение ударной вязкости получено при содержании хрома 2,5%. В свою очередь, в работе [9] говорится о снижении степени упрочнения марганцевого аустенита при введении хрома в состав γ -матрицы из-за связывания углерода в карбиды.

В настоящее время практический интерес представляет применение в условиях производства азотированного феррохрома, полученного при помощи саморазвивающегося высокотемпературного синтеза.

На сегодняшний день известны сплавы на базе стали Гадфильда, легированной азотированным феррохромом, например: 110Г13ХФАЛ, 130Г14ХМФАЛ и др. В химическом составе этих марок высокомарганцевой стали содержится хром, концентрация которого не превышает 1,0%. Введение в сталь азотированного феррохрома более 1,0% может существенно повлиять на износостойкость высокомарганцевой стали.

Целью проводимой работы является изучение влияния азотированного феррохрома на структуру и механические свойства, а также коэффициент износостойкости высокомарганцевой стали при условии остаточного содержания хрома в составе сплава более 1,0%, а также оценка величины коэффициента износостойкости до и после проведения термической обработки.

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, химический состав которого представлен в **табл. 1**.

Таблица 1

Химический состав азотированного феррохрома марки ФХН-10

Элемент	Cr	C	Si	P	S	Al	N
Массовая доля, %	66,2	0,06	0,72	0,003	0,004	0,09	11,1

Исследования проводили на стандартных образцах с размерами 35×35×10 мм. Для реализации различных 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 SPECTRMAXh.

Размера 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 про-

боподготовки фирмы Buechler. Для выявления микроструктуры поверхность шлифов подвергали травлению в 4%-ном растворе азотной кислоты в этиловом спирте методом погружения полированной поверхности в ванну с реактивом.

Растровый электронно-микроскопический анализ осуществляли с помощью сканирующего электронного микроскопа JEOL JSM-6490 LV при ускоряющем напряжении 30 кВ. Исследования проводили на микрошлифах, используемых для световой микроскопии, в режимах вторичных электронов при увеличениях от 30 до 50000 крат (исследования выполнены в ЦКП НИИ Наносталей ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»).

Микротвердость определяли на твердомере Buechler 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.

Износостойкость сплавов изучали в соответствии с ГОСТ 23.208-79.

Результаты исследований и их обсуждение

Провели серию экспериментов, в ходе которых в расплав стали марки 110Г13Л вводили азотированный феррохром марки ФХН-10. Химический состав полученных образцов представлен в табл. 2.

Экспериментальные образцы испытали на износостойкость. Полученные результаты представлены графически на рис. 1.

Как видно из рис. 1, высокомарганцевая сталь в литом состоянии обладает максимальным значением коэффициента износостойкости ($K_n \approx 2,1$ ед.) при содержании в ней хрома порядка 2,0%. При содержании хрома менее 1,5 и более 2,5% коэффициент износостойкости снижается на 15–20%. Следует отметить, что такая тенденция характерна для всех образцов вне зависимости от типа формы, в которую были залиты образцы.

При содержании хрома 1,0% и менее исследуемая сталь в литом состоянии имеет значение коэффициента износостойкости около 1,1 ед. [10–16].

Таблица 2

Химический состав полученных экспериментальных образцов

Концентрация химических элементов, %													
C		Si		Mn		P		S		Cr		Al	
*	**	*	**	*	**	*	**	*	**	*	**	*	**
1,15	0,60	1,05	0,65	11,6	11,3	0,04	0,050	0,033	0,045	0,85	0,84	0,08	0,40
1,10	0,59	1,18	0,81	11,75	9,8	0,04	0,046	0,035	0,048	1,40	1,35	0,08	0,16
1,07	0,70	0,90	0,87	11,55	11,7	0,04	0,050	0,032	0,045	1,91	1,90	0,06	0,71
1,20	0,33	0,74	0,93	11,60	10,4	0,04	0,056	0,033	0,032	2,15	2,08	0,06	0,05
1,15	0,42	1,08	0,98	11,75	11,3	0,04	0,043	0,033	0,040	3,15	3,15	0,07	0,54

* Концентрация элемента до термической обработки; ** – после термической обработки.

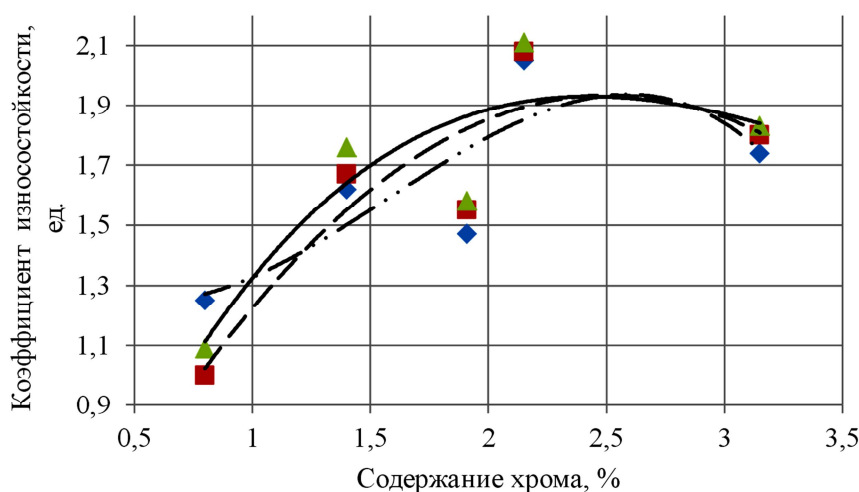


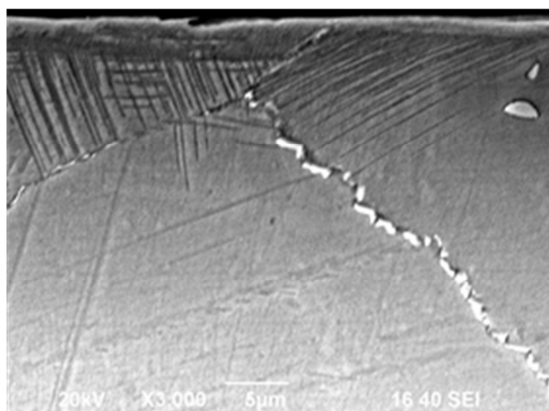
Рис. 1. Изменение коэффициента износостойкости в зависимости от содержания хрома:

... — сухая ПГФ ($R^2=0,624$); - - - сырая ПГФ ($R^2=0,8057$); — кокиль ($R^2=0,7641$)

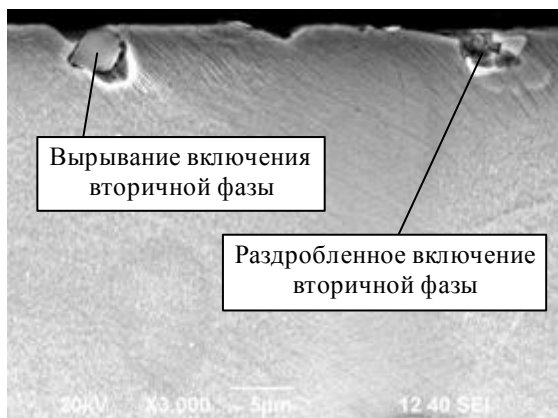
На **рис. 2** представлены фотографии микроструктуры поверхности износа стали марки 110Г13Л в литом состоянии.

Износостойкость высокомарганцевой стали в литом состоянии, в первую очередь, обеспечивается за счёт протекания процесса деформационного двойникования (**рис. 2, а**). Преимущественно ориентация деформационных двойников отличается в соседних зёрнах (**рис. 2, б**). В пределах одного зерна может существовать несколько ориентаций.

По границам зерен выделяются включения вторичной фазы продолговатой формы размерами от 0,5 до 3 мкм.



а



б

Рис. 2. Микроструктура поверхности износа высокомарганцевой стали в литом состоянии: а – деформационные двойники; б – включения вторичной фазы

На процесс изнашивания оказывает влияние твёрдая вторичная фаза, распределённая в мягкой аустенитной матрице. По мере изнашивания аустенита частицу либо вырывает целиком или дробит на фрагменты, после чего их «вымывает» абразив.

Количество вторичной фазы изменяется в зависимости от количества вводимого хрома, а также типа литейной формы (скорости охлаждения). Полученные зависимости представлены на **рис. 3**.

Согласно представленным на **рис. 3** зависимостям общая доля карбидов увеличивается по мере увеличения содержания хрома, являющегося сильным карбидообразующим элементом.

При увеличении скорости охлаждения (сухая ПГФ – сырая ПГФ – кокиль) общая доля карбидов снижается. Это обусловлено более интенсивным охлаждением кристаллизующегося металла и уменьшением времени пребывания металла в интервале выделения вторичных фаз. В результате этого вторичная фаза выделяется в меньшем объёме. Так как хром имеет большее сродство к углероду, чем марганец, по мере его увеличения содержания происходит снижение количества карбидов марганца (**рис. 3, в**). При увеличении скорости охлаждения процесс замены карбидов марганца на карбиды хрома ускоряется.

После проведения термической обработки коэффициент износостойкости опытных образцов снижается на 23–36%, что хорошо видно из графика, представленного на **рис. 4**.

Максимальным значением коэффициента износостойкости ($K_{и}=1,5$ ед.) обладает сталь с содержанием хрома около 3,15%, залитая в сухую ПГФ.

Как видно из **рис. 4**, 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.

Зависимость коэффициента износостойкости от содержания хрома в составе стали обусловлена комплексным влиянием химического состава, параметров микроструктуры и механических свойств стали. При проведении металлографических исследований были определены следующие характеристики микроструктуры стали Гадфильда: средний размер зерна аустенита до и после проведения термической обработки, коэффициент анизотропии зерна. Кроме того, были проведены исследования твёрдости и микротвёрдости полученных экспериментальных образцов в литом и термообработанном состояниях.

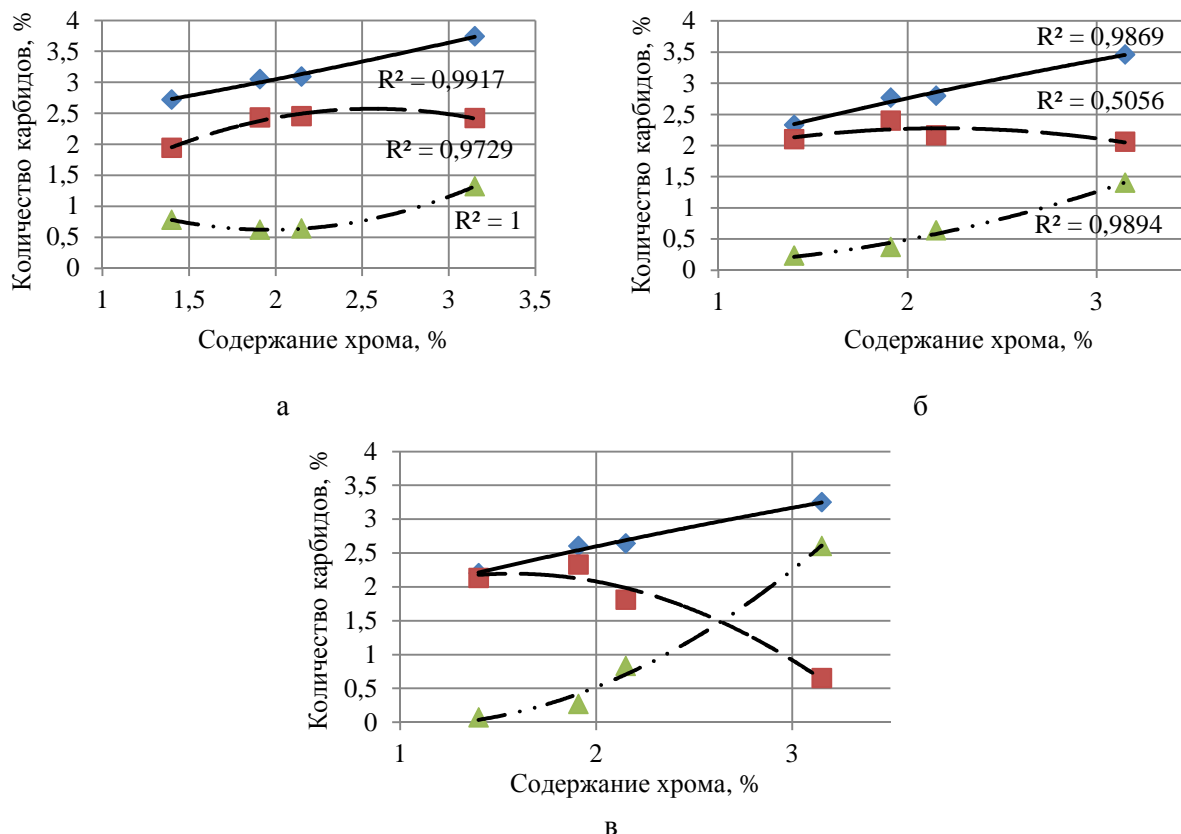


Рис. 3. Зависимость количества карбидов от содержания хрома и типа литейной формы: а – сухая ППФ; б – сырая ППФ; в – кокиль; — — — — общее количество карбидов, %; - - - - карбидов марганца, %; . . . — — — карбидов хрома, %

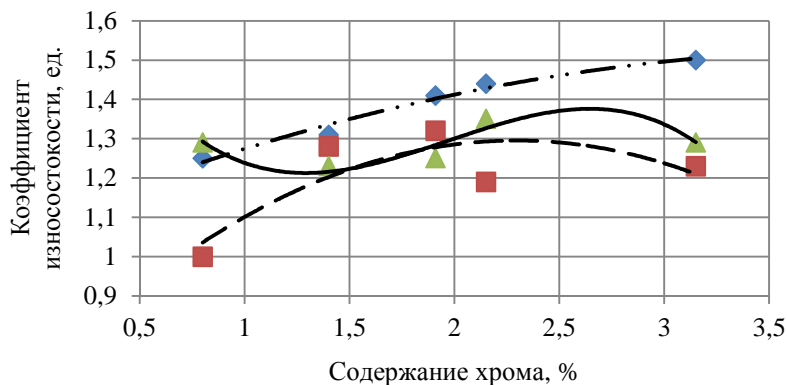


Рис. 4. Влияние содержания хрома на коэффициент износостойкости высокомарганцевой стали после термической обработки: . . . — — — — сухая ППФ ($R^2=0,9757$); - - - - сырая ППФ ($R^2=0,6753$); — — — — кокиль ($R^2=0,7743$)

Размер зерна аустенита полученных образцов зависит от содержания хрома, а также от типа литейной формы (скорости охлаждения). С увеличением концентрации хрома наблюдается увеличение среднего размера зерна аустенита как в литом, так и термообработанном состоянии независимо от типа формы. При этом по мере увеличения интенсивности отвода тепла в процессе кристаллизации сплава (тип формы: сухая

ППФ – сырая ППФ – кокиль) происходит уменьшение среднего размера зерна до и после проведения термической обработки. Полученные данные наглядно представлены на **рис. 5**.

Коэффициент анизотропии зерна характеризует отношение его длины к ширине. Анизотропию зерна исследовали при помощи специализированного модуля программы Ticsomet. Полученные данные представлены в **табл. 3**.

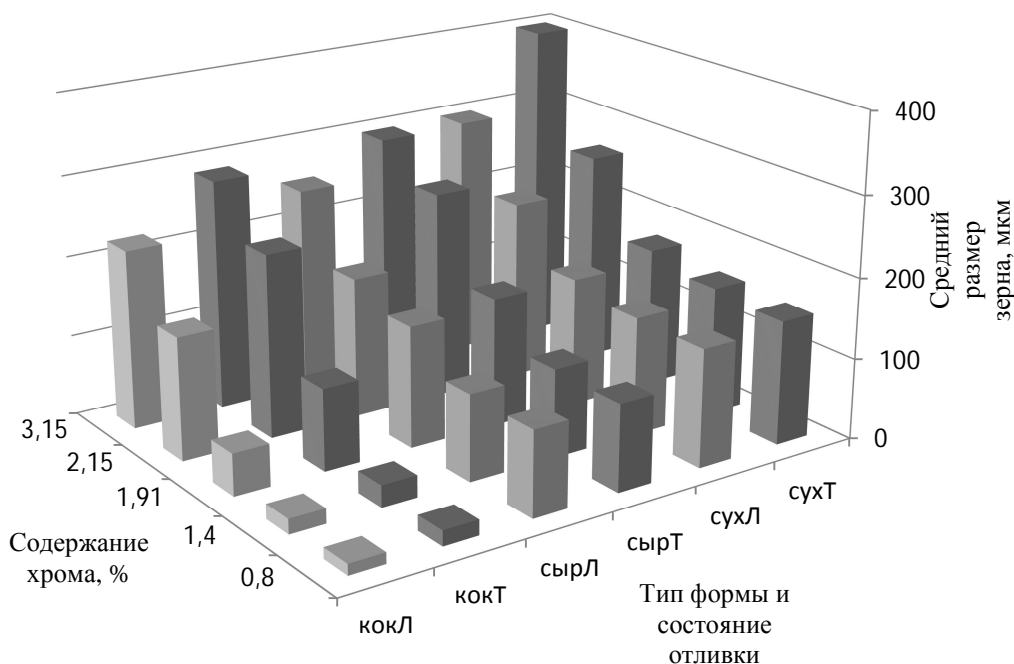


Рис. 5. Влияние содержания хрома и типа литейной формы на средний размер зерна аустенита стали Гадфильда в литом и термообработанном состояниях: сух – сухая ПГФ; сыр – сырая ПГФ; кок – кокиль; Л – в литом состоянии; Т – после термической обработки

Проанализировав полученные данные, установили, что по мере увеличения содержания хрома в химическом составе стали Гадфильда происходит увеличение коэффициента анизотропии зерна аустенита. Это говорит об увеличении длины зерна аустенита при одновременном уменьшении ширины. Такая тенденция характерна как для литого состояния отливки, так и для термически обработанного.

ретают 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 происходит качественная смена характера влияния скорости охлаждения на его величину. При концентрации хрома менее 2,0% увеличение скорости охлаждения 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.

Таблица 3
Изменение анизотропии зерна в зависимости от содержания легирующего элемента, типа формы, состояния отливки

Содержание хрома, %	Литое состояние			После термической обработки		
	сухая ПГФ	сырая ПГФ	кокиль	сухая ПГФ	сырая ПГФ	кокиль
0,8	2,0	1,9	1,6	2,0	1,8	1,3
1,4	2,2	2,0	1,8	2,1	1,8	1,5
1,91	3,6	3,5	4,0	2,3	2,3	2,7
2,15	3,7	3,8	4,4	3,3	3,4	3,3
3,15	4,0	4,2	5,1	3,5	3,7	4,5

Данные по микротвёрдости зерен аустенита до и после термической обработки, а также в зависимости от содержания хрома представлены графически на рис. 6.

С увеличением количества хрома в стали и скорости охлаждения сплава в период кристаллизации анизотропия (вытянутость) зерён увеличивается. После термической обработки зерна приоб-

Проанализировав представленные данные, установили, что значение микротвёрдости зерен аустенита увеличивается на 5–11% (литое состояние) и на 11–23% (после термической обработки) по мере увеличения концентрации хрома в химическом составе стали от 1,0 до 3,15%. В зависимости от скорости охлаждения (типа литейной формы) значение микротвёрдости аустенита увеличивается от 3 до 17% для образцов в литом

состоянии, а для образцов в термообработанном состоянии это увеличение составляет от 6 до 29%. Следует отметить, что наибольшее увеличение микротвёрдости аустенита в процентном отношении характерно для содержания хрома в составе сплава порядка 1,91% в литом состоянии и 2,15% в термообработанном.

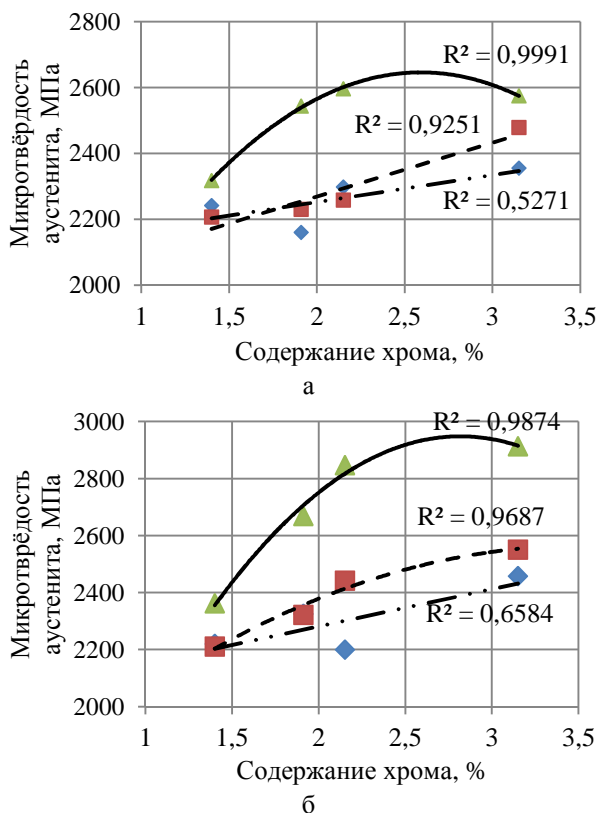


Рис. 6. Зависимость микротвёрдости аустенита от содержания хрома в составе стали от термической обработки (а) и после (б):
 . . . — сухая ПГФ; - - - сырая ПГФ;
 — — — — — кокиль

Значение твёрдости исследуемых образцов существенно не изменяется и находится в пределах от 84 до 90 HRB.

Выводы

1. Максимальное значение коэффициента износостойкости высокомарганцевой стали достигнуто при содержании 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.
3. Установлено влияние содержания хрома и

скорости охлаждения на анизотропию зерна, а также концентрация хрома, при которой происходит качественная смена характера влияния скорости охлаждения сплава на этот коэффициент.

4. При содержании хрома свыше 2,0% наблюдается максимальное значение микротвёрдости аустенита.

Список литературы

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., Блажих Б.М., Бигеев А.М. К вопросу повышения качества отливок из высокомарганцевой стали 110Г13Л. Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1972. 139 с.
3. Давыдов Н.Г. Высокомарганцевая сталь. М.: Металлургия, 1979. 176 с.
4. 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.
5. Федосеев С.Н., Шарафутдинова А.С. Изменение стального слитка модифицирование структуры // Сборник трудов Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы современного машиностроения». 2014. С. 355–357.
6. Зыкова А.П., Федосеев С.Н., Лычагин Д.В. Модифицирование стали 110Г13Л // Сборник научных трудов VII Международной научно-технической конференции «Современные проблемы машиностроения». 2013. С. 86–90.
7. Обработка стали 110Г13Л барий-стронциевыми карбонатами / В.А. Розум, С.П. Задрущий, А.П. Беженко и др. // Литье и металлургия. 2010. № 4. С. 89–94.
8. Сысоев А.М., Бахметьев В.В., Колокольцев В.М. Рафинирование и модифицирование стали 110Г13Л комплексом титан-бор-кальций // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2008. № 1. С. 43–45.
9. Косицина Н.И., Сагарадзе В.В. Аустенитные стали разных систем легирования с карбидным упрочнением // Металлы. 2001. № 6. С. 65–74.
10. Исследование влияния процесса кристаллизации стали марки 110Г13Л на её свойства / К.Н. Вдовин, Н.А. Феоктистов, Д.А. Горленко и др. // Литейные процессы. 2015. № 14. С. 29–36.
11. Изучение влияния скорости охлаждения на механические и эксплуатационные свойства стали 110Г13Л / К.Н. Вдовин, Н.А. Феоктистов, Д.А. Горленко и др. // Литейщик России. 2015. № 12. С. 23–24.
12. Weilin Yan, Liang Fang, Zhanguang Zheng, Kun Sun, Yunhua Xu. Effect of surface nanocrystallization on abrasive wear properties in Hadfield steel. Tribology International. Volume 42, Issue 5, May 2009. Pp. 634–641. doi:10.1016/j.triboint.2008.08.012.
13. Mehdi Mazar Atabaki, Sajjad Jafari, Hassan Abdollah-pour. Abrasive Wear Behavior of High Chromium Cast Iron and Hadfield Steel-A Comparison. Journal Of Iron And Steel Research, International. Volume 19, Issue 4, April 2012. Pp. 43–50. doi:10.1016/S1006-706X(12)60086-7.
14. Yuri N. Petrov, Valentin G. Gavriljuk, Hans Berns, Fabian Schmalt. Surface structure of stainless and Hadfield steel after impact wear. Wear. Volume 260, Issue 6, 10 March 2006. Pp. 687–691. doi:10.1016/j.wear.2005.04.009.
15. O.A. Zambrano, Yesid Aguilar, Jairo Valdés, S.A. Rodríguez,

J.J. Coronado. Effect of normal load on abrasive wear resistance and wear micromechanisms in FeMnAlC alloy and other austenitic steels. *Wear*. Volumes 348–349, 15 February 2016. Pp. 61–68. doi:10.1016/j.wear.2015.11.019.

16. Feng XiaoYong, Zhang FuCheng, Zheng ChunLei, LÜ Bo. Micro-mechanics behavior of fatigue cracks in Hadfield steel railway crossing. *Science China Technological Sciences*. 2013 Volume 56, No. 5. Pp. 1151–1154. doi: 10.1007/s11431-013-5181-x.

Материал поступил в редакцию 14.07.16.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

DOI:10.18503/1995-2732-2016-14-3-46-54

A STUDY OF MECHANICAL AND PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF HIGH-MANGANESE STEEL ALLOYED WITH NITRIDED FERROCHROMIUM

Valerii M. Kolokoltsev – D.Sc. (Eng.), Professor, Rector
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Konstantin N. Vdovin – D.Sc. (Eng.), Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Phone: +7 (3519) 29-85-30. E-mail: Vdovin@magtu.ru. orcid: <http://orcid.org/0000-0003-3244-3327>

Viktor P. Chernov – D.Sc. (Eng.), Professor
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Nikolai A. Feoktistov – Ph.D. (Eng.), Assistant Professor
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6091-7983>

Dmitrii A. Gorlenko – Ph.D. (Eng.), Assistant Professor
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3040-8635>

Abstract

Problem Statement (Relevance): Extending the life of cast parts made of high-manganese steel and operating in abrasive and impact wear conditions is an urgent issue that the foundry industry is facing today. At present, there are a lot of alloying materials on offer, which are capable of enhancing the mechanical and performance characteristics of alloys. The industrial application of such materials is limited due to the lack of evidence about the effect the materials on offer produce on the performance characteristics and other properties of the final products. **Objectives:** The aim of this research is to study the effect of nitrided ferrochromium on the wear resistance of high-manganese steel, as well as to study the microstructure of the wear surface at different chromium concentrations. **Methods Applied:** To achieve the above objectives a number of laboratory experiments and metallographic tests were carried out, and the mechanical and performance characteristics of the pilot alloys were examined using the methods specified in the national standards. **Findings:** The paper describes the results of a full-scale investigation of high-manganese steel alloyed with nitrided ferrochromium. The authors demonstrate how the chromium concentration and the alloy cooling rate effect the cast structure formation in and the mechanical and performance characteristics of high-manganese steel. The optimum chromium concentration was determined, which provides the maximum wear resistance index in the as-cast state and after heat treatment. The authors analyse how nitrided ferrochromium and the alloy cooling rate effect the anisotropy factor of the austenite grain. The

article looks at a number of cases of the austenitic matrix wear caused by chromium carbides, as well as the effect of chromium on the austenitic matrix microhardness. **Practical Relevance:** The results obtained may be useful when selecting the chemical composition of high-manganese steel for improved performance.

Keywords: High-manganese steel, nitrided ferrochromium, cooling rate, wear resistance index, microstructure, microhardness.

References

1. Bedrin N.I., Stadnichuk V.I., Stadnichuk A.V. et al. Looking at how the chemical composition of the 110G13L steel effect its properties. *Liteynye protsessy* [Casting processes], 2003, no. 3, pp. 36–42. (In Russ.)
2. Davydov N.G., Blagikh B.M., Bigeev A.M. On improving the quality of the 110G13L high-manganese steel castings. Tomsk: Publishing house of the Tomsk University, 1972, 139 p. (In Russ.)
3. Davydov N.G. High-manganese steel. Moscow: Metallurgiya, 1979, 176 p. (In Russ.)
4. Kolokoltsev V.M., Dolgopolova L.B., Mulyavko N.M. The effect of chemical composition on the structure and properties of austenitic chromium-manganese steels. *Liteynye protsessy* [Casting processes], 2003, no. 3, pp. 31–36. (In Russ.)
5. Fedoseev S.N., Sharafutdinova A.S. Changes in a steel ingot and modification of its structure. *Sbornik trudov Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Aktual'nye problemy sovremennogo mashinostroeniya"* [Research papers of the International Research Conference on the Urgent Issues of Mechanical Engineering], 2014, pp. 355–357.
6. Zykova A.P., Fedoseev S.N., Lychagin D.V. Modification of the 110G13L steel grade. *Sbornik nauchnykh trudov VII Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii "Sov-*

- remennye problemy mashinostroeniya" [Research papers of the 7th International Research Conference on the Current Issues of Mechanical Engineering], 2013, pp. 86–90. (In Russ.)
7. Rozum V.A., Zadrutskiy S.P., Bezhenok A.P. et al. The 110G13L steel grade processed with barium and strontium carbonates. *Litye i metallurgiya* [Casting and metallurgy], 2010, no. 4, pp. 89–94.
 8. Sysoev A.M., Bakhmetyev V.V., Kolokoltsev V.M. Refining and modifying the 110G13L steel grade with a titanium-boron-calcium complex. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2008, no. 1, pp. 43–45. (In Russ.)
 9. Kositsina N.I., Sagaradze V.V. Austenitic carbide steels of different alloying systems. *Metally* [Metals], 2001, no. 6, pp. 65–74. (In Russ.)
 10. Vdovin K.N., Feoktistov N.A., Gorlenko D.A. et al. Looking at the effect of crystallization on 110G13L steel properties. *Litynye protsessy* [Casting processes], 2015, no. 14, pp. 29–36. (In Russ.)
 11. Vdovin K.N., Feoktistov N.A., Gorlenko D.A. et al. Looking at how the cooling rate affects the mechanical and performance characteristics of the 110G13L steel grade. *Liteyshchik Rossii* [Foundry man of Russia], 2015, no. 12, pp. 23–24.
 12. Weilin Yan, Liang Fang, Zhanguang Zheng, Kun Sun, Yunhua Xu. Effect of surface nanocrystallization on abrasive wear properties in Hadfield steel. *Tribology International*. Vol. 42, iss. 5, May 2009, pp. 634–641. doi:10.1016/j.triboint.2008.08.012.
 13. Mehdi Mazar Atabaki, Sajjad Jafari, Hassan Abdollah-pour. Abrasive Wear Behavior of High Chromium Cast Iron and Hadfield Steel – A Comparison. *Journal of Iron and Steel Research, International*. Vol. 19, iss. 4, April 2012, pp. 43–50. doi:10.1016/S1006-706X(12)60086-7.
 14. Yuri N. Petrov, Valentin G. Gavriljuk, Hans Berns, Fabian Schmalt. Surface structure of stainless and Hadfield steel after impact wear. *Wear*. Vol. 260, iss. 6, 10 March 2006, pp. 687–691. doi:10.1016/j.wear.2005.04.009.
 15. O.A. Zambrano, Yesid Aguilar, Jairo Valdés, S.A. Rodríguez, J.J. Coronado. Effect of normal load on abrasive wear resistance and wear micromechanisms in FeMnAlC alloy and other austenitic steels. *Wear*. Vol. 348–349, 15 February 2016, pp. 61–68. doi:10.1016/j.wear.2015.11.019.
 16. Feng XiaoYong, Zhang FuCheng, Zheng ChunLei, LÜ Bo. Micromechanics behavior of fatigue cracks in Hadfield steel railway crossing. *Science China Technological Sciences*. 2013 Vol. 56, no. 5, pp. 1151–1154. doi: 10.1007/s11431-013-5181-x

Received 14/07/16

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. Т.14. №3. С. 46–54. doi:10.18503/1995-2732-2016-14-3-46-54

Kolokoltsev V.M., Vdovin K.N., Chernov V.P., Feoktistov N.A., Gorlenko D.A. A study of mechanical and performance characteristics of high-manganese steel alloyed with nitrided ferrochromium. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2016, vol. 14, no. 3, pp. 46–54. doi:10.18503/1995-2732-2016-14-3-46-54
