МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

УДК 621.74 https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-2-54-62

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ АБРАЗИВНОГО И УДАРНО-АБРАЗИВНОГО ИЗНАШИВАНИЯ ВЫСОКОМАРГАНЦЕВОЙ СТАЛИ

Колокольцев В.М.[1], Вдовин К.Н.[1], Чернов В.П.[1], Феоктистов Н.А.[1], Горленко Д.А.[1], Дубровин В.К.[2]

[1] Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И.Носова, Магнитогорск, Россия
[2] Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация
Актуальность работы: в процессе эксплуатации деталей в механизмах и агрегатах происходит их изнашивание, что определяет срок службы всего узла. Интенсивность изнашивания будет зависеть от нескольких факторов, таких как химический состав сплава, параметры микроструктуры, механические свойства, а также условий, в которых осуществляется износ, – скольжение, удар, нагрев и т.д. Действие этих факторов будет определять механизм изнашивания деталей из различных износостойких сплавов, в том числе и высокомарганцевой стали. Детальное исследование механизмов износа позволит, во-первых, уточнить роль микроструктуры сплава в процессе изнашивания, во-вторых, сформировать уточнённое представление о механизмах изнашивания высокомарганцевой стали в различных условиях и определить роль некоторых легирующих элементов в этих механизмах. **Цель работы** – изучение металлографическим путём механизмов абразивного и ударно-абразивного изнашивания высокомарганцевой стали, а также оценка превращений структуры сплава, протекающих в очаге износа. **Используемые методы:** для решения поставленных задач в условиях лаборатории проводили эксперименты по изнашиванию опытных образцов из высокомарганцевой стали в различных условиях. Поверхности, полученные после износа в различных условиях, исследовали на металлографическом оборудовании. **Полученные результаты:** установлены закономерности изменения структуры высокомарганцевой стали в условиях абразивного и ударно-абразивного изнашивания; определены количественные параметры структурных составляющих сплава, формирующихся в условиях различных видов изнашивания; рассмотрена роль вторичной фазы в механизме изнашивания высокомарганцевой стали при реализации различных видов износа. Полученные данные расширяют современное представление о процессах, протекающих при эксплуатации деталей из высокомарганцевой стали в условиях абразивного и ударно-абразивного износа, а также могут быть полезны при выборе химического состава стали с целью увеличения её износостойкости.

Ключевые слова: высокомарганцевая сталь, аустенит, вторичная фаза, упрочнённый слой, мартенсит, деформационные двойники.

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

Введение

Сменные детали некоторых узлов и механизмов, эксплуатирующиеся в промышленности, контактируют с различными абразивными материалами: руда, гравий, кокс и др. Результатом такого взаимодействия является износ этих деталей, что обуславливает применение износостойких сплавов в качестве материала для их изготовления. Одним из таких материалов является высокомарганцевая сталь, в том числе сталь марки 110Г13Л [1–3].

© Колокольцев В.М., Вдовин К.Н., Чернов В.П., Феоктистов Н.А., Горленко Д.А., Дубровин В.К., 2017

Износостойкость этой стали обеспечивается уникальным комплексом механических свойств, а также её аустенитной структурой. Аустенит имеет способность упрочняться после деформации, образуя при этом более прочный слой. В результате этих превращений износостойкость высокомарганцевой стали увеличивается. Кроме того, при определённом внешнем воздействии – условиях износа, протекание деформационных процессов по тем или иным механизмам определяет непосредственно механизм изнашивания стали в целом.

В настоящее время механизмы протекания деформационных процессов в аустенитных сталях в условиях внешнего физического воздей-

ствия довольно подробно рассмотрены в работах отечественных и зарубежных исследователей [4–7]. Авторы статей [4–6] рассматривают механизм деформационного двойникования, реализующийся при высокой интенсивности внешнего физического воздействия на высокомарганцевую сталь. При этом они подтверждают, что при таких условиях механизм дислокационного скольжения в аустените не реализуется. При незначительном физическом воздействии деформационные двойники образуют тонкую сетку. По мере увеличения нагрузки реализуются процессы дислокационного скольжения, что приводит к разрушению сетки двойников, резкому упрочнению высокомарганцевой стали и повышению её твёрдости [5]. Управлять деформационными процессами авторы предлагают посредством легирования и модифицирования расплава стали химическими элементами.

Процесс абразивного изнашивания литой высокомарганцевой стали и протекающие при этом структурные превращения описаны в работах [8–10]. В работе [8] рассмотрено изменение коэффициента износостойкости в зависимости от концентрации марганца в составе сплава. Авторами этих работ установлено, что присутствие в структуре сплава большого количества ε-мартенсита (более 30 %) снижает сопротивление высокомарганцевой стали абразивному изнашиванию, что обусловлено низким сопротивлением этой фазы процессам микрорезания. Кроме того, рассмотрена кинетика упрочнения стали марки 110Г13Л [9–10]. В начальный момент внешнего воздействия происходит резкий рост микротвёрдости аустенита с 2500 до 7500–8000 МПа, а при дальнейшем нагружении – плавное увеличения микротвёрдости структурных составляющих до 9500–10500 МПа. Также авторы этих работ рассматривают тонкий упрочнённый слой толщиной от 1 до 5 мкм, образующийся в процессе изнашивания высокомарганцевой стали. Они считают, что этот слой обладает сверхпластичностью, в результате чего в нем гасится значительная часть энергии от воздействия абразива в процессе изнашивания.

Эксплуатация деталей из высокомарганцевой стали в промышленности происходит при реализации двух основных видов изнашивания: скольжение по абразиву и абразивное изнашивание при ударе [3].

В условиях скольжения изнашиваемой детали по абразивному материалу элементарной составляющей механизма изнашивания остаётся микрорежущее и деформирующее действие единичной абразивной частицы [3].

Ударно-абразивное изнашивание деталей из высокомарганцевой стали протекает в более тяжелых условиях, чем просто абразивный износ. В результат такого вида изнашивания формируется характерный рельеф поверхности, а также протекают деформационные процессы в металле, приводящие к образованию микротрещин в нем, его срезанию и выкрашиванию [12, 13].

При практической реализации обоих видов износа ключевую роль будет играть структура сплава. Наличие вторичных фаз различной морфологии вносит коррективы в механизм изнашивания деталей из высокомарганцевой стали.

Целью проводимой работы является изучение металлографическим путём механизмов абразивного и ударно-абразивного изнашивания изделий из высокомарганцевой стали, а также оценка превращений структуры сплава, протекающих в очаге износа.

Материалы и методы исследования

Экспериментальные сплавы для изучения структуры и свойств выплавляли в индукционной печи ИСТ-006 с основной футеровкой.

Термическую обработку образцов осуществляли в окислительной среде.

Исследования проводили на стандартных образцах с размерами 35×35×10 мм.

Базовый химический состав стали, из которой были изготовлены образцы при реализации различных скоростей охлаждения, представлен в **таблице**. Для проведения исследований также были изготовлены образцы из стали, легированной хромом в количестве от 1,0 до 3,15 мас. %.

Базовый химический состав высокомарганцевой стали

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

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 SPECTROMAXx.

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

Для металлографического анализа из образцов, прошедших испытание на различные виды изнашивания, отрезали микротемплеты. Из них 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 смеси концентрированных кислот (65% HNO_3 и 35% HCl) методом погружения полированной поверхности в ванну с реактивом.

Исследование изношенной поверхности проводили на сканирующем электронном микроскопе JEOL JSM-6490 LV при ускоряющем напряжении 20 кВ, в режимах вторичных электронов при увеличениях от 1500 до 20000 крат (исследования выполнены в ЦКП НИИ Наносталей ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»).

Результаты исследований и их обсуждение

Формирование свойств отливок из высокомарганцевой стали, в том числе износостойкости, при прочих равных условиях, осуществляется на стадии кристаллизации расплава в литейной форме, а также в процессе термической обработки. Если процесс термической обработки легко поддаётся контролю, а его основные параметры (температура в печи, время выдержки) довольно просто зафиксировать на одном и том же уровне, то процесс кристаллизации расплава в литейной форме является сложным и плохо контролируемым. В то же время закономерности формирования литой структуры стали и кинетика выделения твёрдой фазы во взаимосвязи с изменением температуры и составом образующихся фаз определяют уровень свойств отливок, в частности износостойкость в различных условиях.

В ходе проведения лабораторных экспериментов были получены образцы из высокомарганцевой стали, закристаллизовавшиеся в литейной форме с разными скоростями охлаждения. Химический состав сплава образцов указан в **таблице**. Полученные образцы в литом и термообработанном состояниях испытали на износостойкость в среде незакрепленных абразивных частиц. Результаты проведённого эксперимента представлены графически в виде зависимости коэффициента износостойкости от скорости охлаждения сплава в интервале выделения избыточных фаз **(рис. 1)**.

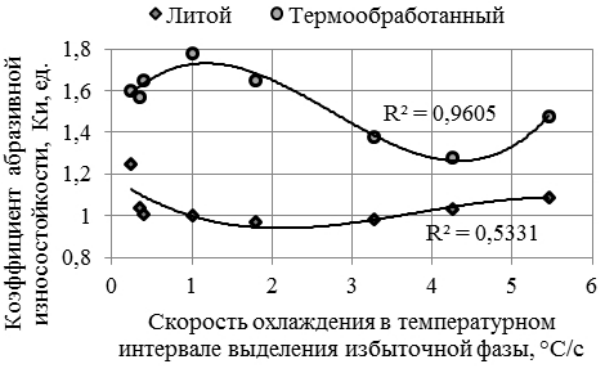


Рис. 1. Зависимость коэффициента абразивной износостойкости от скорости охлаждения сплава в интервале выделения избыточных фаз

Характер зависимости коэффициента износостойкости от скорости охлаждения образцов в литом состоянии обусловлен изменяющимися значениями энергии дефектов упаковки аустенита (ЭДУ), а также морфологией карбидной фазы.

Зависимость ЭДУ аустенита от скорости охлаждения сплава в литом и термообработанном состояниях представлена на **рис. 2**.

Рис. 2. Зависимость энергии дефекта упаковки аустенита от скорости охлаждения сплава в интервале выделения избыточных фаз

Следует отметить, что от величины ЭДУ зависит механизм деформации аустенита при внешнем воздействии – деформационное двойникование, либо дислокационное скольжение [14]. При реализации каждого из этих механизмов деформации образуются упрочнённые слои с разными характеристиками, од-

ной из которых является его средняя толщина. Согласно работам [15–16] деформационное двойникование реализуется в случае, если значение ЭДУ менее 48 МДж/м^2, что характерно для структуры высокомарганцевой стали, охладившейся со скорость менее 1°С/с и более 4°С/с в температурном интервале выделения избыточных фаз. Механизм дислокационного скольжения, для которого характерно образование тонкого и менее износостойкого упрочнённого слоя, реализуется в тех структурах, которые охлаждались со скоростями от 1,8 до 4°С/с в температурном интервале выделения карбидов. Влияние скорости охлаждения сплава на ЭДУ проявляется в перераспределении химических элементов между аустенитом и карбидной фазой, а также в изменении степени легированности аустенита при этом.

В литом состоянии влияние ЭДУ аустенита на формирование упрочнённого слоя осуществляется при дополнительном воздействии карбидной фазы на этот процесс. Для микроструктуры высокомарганцевой стали, сформировавшейся при скоростях охлаждения менее 1°С/с, выделяется большое количество карбидов – 14,8%, имеющих более высокое сопротивление изнашиванию, чем аустенит. При этом коэффициент износостойкости равен 1,2 ед. Согласно графику, представленному на **рис. 2**, значение ЭДУ аустенита для этих условий менее 48 МДж/м^2, следовательно, в данном случае реализуется механизм деформационного двойникования.

При увеличении скорости охлаждения сплава в рассматриваемом температурном интервале до значений, находящихся в диапазоне от 1,8 до 4,0 °С/с, коэффициент износостойкости высокомарганцевой стали снижается до 0,9 ед. В литом состоянии это прежде всего связано с уменьшением карбидной фазы до 2,8% [17–18], а также с повышением значения ЭДУ свыше 48 МДж/м^2 (см. **рис. 2**). При этом происходит качественная смена механизма деформационного двойникования аустенита на дислокационное скольжение.

Повышение скорости охлаждения сплава в температурном интервале выделения избыточных фаз до значений более 4°С/с способствует увеличению коэффициента износостойкости в среднем до 1,1 ед. Увеличение значения коэффициента износостойкости можно объяснить повышением степени легированности аустенита марганцем, что приводит к увеличению микротвёрдости аустенита [19]. При этом происходит снижение ЭДУ до значений менее 45 МДж/м^2, что способствует реализации механизма деформационного двойникования аустенита при наличии внешнего воздействия.

Следует отметить, что наличие карбидной фазы в структуре сплава высокомарганцевой стали дополнительно стимулирует формирование упрочнённого слоя. В процессе абразивного изнашивания карбиды воспринимают на себя основную внешнюю нагрузку, выступая своего рода рычагом, через который передаётся усилие с поверхности контакта абразива с металлом в более глубокие слои аустенита.

После термической обработки микроструктура высокомарганцевой стали представлена аустенитом. Карбидная фаза отсутствует за исключением некоторых отдельно взятых карбидов, не успевших растворяться в процессе термической обработки. При этом значение ЭДУ существенно меньше 48 МДж/м^2, что обеспечивает протекание процессов деформационного двойникования в результате абразивного износа. Следует отметить, чем меньше значение ЭДУ, тем более легче протекают процессы деформационного двойникования, обеспечивая при этом более высокий коэффициент износостойкости отливок из высокомарганцевой стали. Обобщённая зависимость коэффициента износостойкости от значения ЭДУ представлена на **рис. 3**.

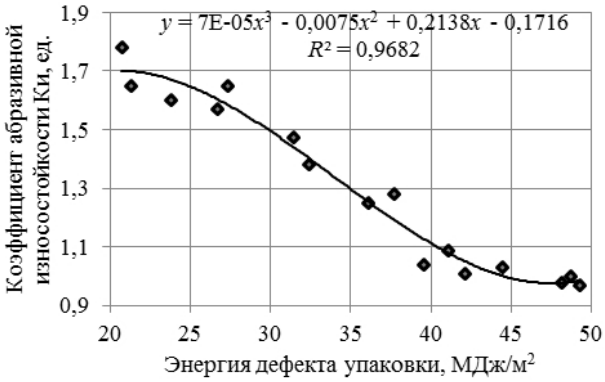


Рис. 3. Зависимость коэффициента износостойкости от энергии дефекта упаковки аустенита

Зависимость средней толщины упрочнённого слоя, образующегося в процессе абразивного изнашивания образцов из высокомарганцевой стали в литом и термообработанном состояниях, от скорости охлаждения сплава в температурном интервале выделения вторичных фаз, представлена на **рис. 4**.

Сравнительный анализ графиков, представленных на **рис. 1** и **4**, показал, что зависимости

коэффициента износостойкости стали Гадфильда и средней толщины упрочнённого слоя от скорости охлаждения сплава в интервале выделения вторичных фаз имеют абсолютно схожий характер.

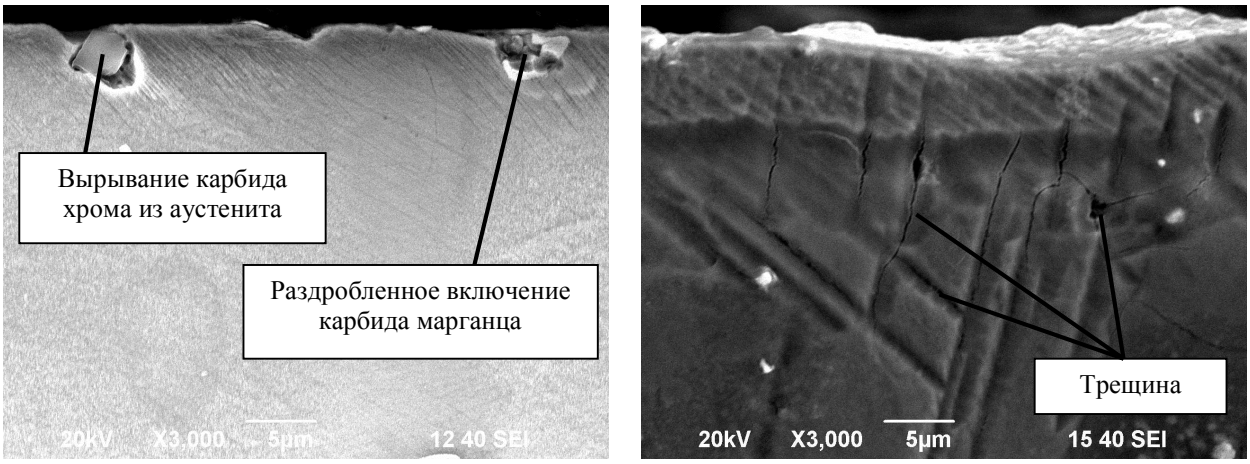
Рис. 4. Зависимость средней толщины упрочнённого слоя от скорости охлаждения сплава в интервале выделения избыточных фаз

В то же время обе эти зависимости обратно пропорцио-нальны по отношению к зависимости энергии дефекта упаковки твёрдого раствора от скорости охлаждения сплава как для литого состояния, так и для термообработанного. Таким образом, в ходе изнашивания деталей из высокомарганцевой стали в среде незакреплённых абразивных частиц механизм изнашивания реализуется через энергию дефекта упаковки аустенита, от величины которой зависит средняя толщина упрочнённого слоя, определяющего способность сплава сопротивляться изнашиванию.

В процессе абразивного и ударно-абразивного изнашивания карбиды играют важную, но в то же время не всегда полезную роль. Для оценки роли различных видов карбидов в процессе изнашивания провели металлографические исследования темплетов, вырезанных из очага абразивного и ударно-абразивного износа. Для изучения влияния всех типов карбидов на механизмы изнашивания исследования проводили в литом и термообработанном состояниях.

Микроструктура высокомарганцевой стали в литом состоянии представлена аустенитом, карбидами марганца, фосфидной эвтектикой, а также при её легировании – карбидами хрома.

Изначально металлографическим путём была исследована микроструктура поверхности изнашивания высокомарганцевой стали, легированной хромом в количестве 2,0%. Установили, что по мере вымывания аустенита происходит непосредственный контакт карбидов с абразивом. В результате этого происходит разрушение карбидов марганца и их выкрашивание, после чего в аустените образуется лунка **(рис. 5, а)**. Она является дополнительным препятствием на пути скольжения абразива по изнашиваемой поверхности, что приводит к локальной интенсификации этого процесса. Карбиды хрома в процессе контакта не разрушаются, но от внешнего абразивного воздействия их вырывает, в результате чего также образуется лунка. Кроме того, наличие рисок, особенно вблизи карбидов, свидетельствует о протекании деформационных процессов в аустените с образованием двойников. Следует отметить, что подобная качественная картина наблюдается и при более высокой концентрации хрома (> 3,0%) в химическом составе высокомарганцевой стали.



а б

Рис. 5. Микроструктура изношенной поверхности высокомарганцевой стали в литом (а) и термообработанном (б) состояниях

После термической обработки количество карбидной фазы уменьшается, в результате чего повышается степень легированности аустенита. При этом механизм изнашивания отливок из высокомарганцевой стали заключается в формировании упрочнённого слоя, поверхность которого постепенно «вымывается» абразивом в результате микрорезания. Упрочнённый слой формируется в результате протекания процессов деформационного двойникования. Такая картина характерна для отливок из высокомарганцевой стали, содержащей в своём химическом составе не более 2,0% хрома. При концентрации хрома в составе исследуемой стали, превышающей 2,0%, наблюдается растрескивание упрочнённого слоя **(рис. 5, б)**. При этом трещины преимущественно находятся на границах деформационных двойников. Наличие трещин приводит к вырыванию отдельных кусков аустенита, что способствует снижению износостойкости отливок.

При ударно-абразивном изнашивании экспериментальных образцов в литом состоянии, как и в случае абразивного изнашивания, карбиды марганца разрушаются, находясь в глубине слоёв аустенита над очагом износа. Разрушение происходит из-за деформации твёрдого раствора. Образующиеся при этом лунки деформируются, приобретая продолговатую вытянутую форму. Карбиды хрома не разрушаются, а после приближения к очагу изнашивания выпадают из своих посадочных мест **(рис. 6)**.

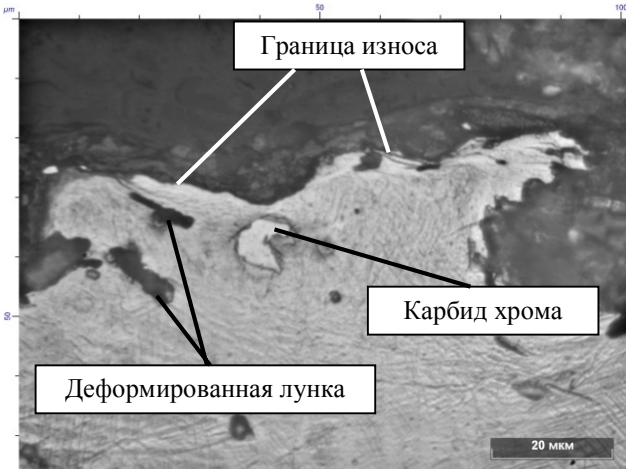


Рис. 6. Поверхность высокомарганцевой стали после ударно-абразивного изнашивания

В случае ударно-абразивного изнашивания в поверхности отливки формируется упрочнённый слой посредством протекающих деформационных процессов. Однако механизм формирования упрочнённого слоя существенно отличается от механизма, реализующегося при абразивном изнашивании.

Рабочая поверхность, полученная в ходе ударно-абразивного изнашивания, включает в себя различные виды структур, чередующихся друг с другом по мере удаления от очага износа **(рис. 7, а)**.

Первый слой, непосредственно контактирующий с абразивом, имеет ультрамелкозернистую структуру **(рис. 7, б)**. Его средняя толщина не превышает 3 мкм, а размер зерна колеблется от 170 до 330 нм. Образование такой структуры обусловлено многократным протеканием деформационных процессов в поверхностных слоях сплава, находящихся в непосредственном контакте с абразивом.

После слоя, имеющего ультрамелкозернистую структуру, располагается переуплотнённый слой, образовавшийся в результате деформационного двойникования. Его толщина в разных участках изношенной поверхности колеблется от 3 до 7 мкм. Переуплотнённый слой сменяется слоем мартенсита, имеющего характерное игольчатое строение **(рис. 7, в)**. Толщина слоя мартенсита, залегающего между двумя переуплотнёнными слоями деформационных двойников, составляет от 10 до 15 мкм. При этом упомянутые слои чередуются, образуя слоистую структуру, в которой находится от двух до пяти каждого из слоёв. Наличие мартенсита **(рис. 7, г)** в исследуемой микроструктуре обуславливает формирование переуплотнённых слоев. Изначально происходит образование слоёв деформационных двойников, после чего в некоторой области поверхности износа протекает локальное мартенситное превращение, для которого характерно увеличение удельного объёма. В результате происходит уплотнение соседних более податливых слоёв аустенита.

Упрочнённый слой заканчивается областью деформационных двойников с нормальным уплотнением (см. **рис. 7, а**), которая граничит с аустенитом. Толщина этого слоя обычно не превышает 10 мкм.

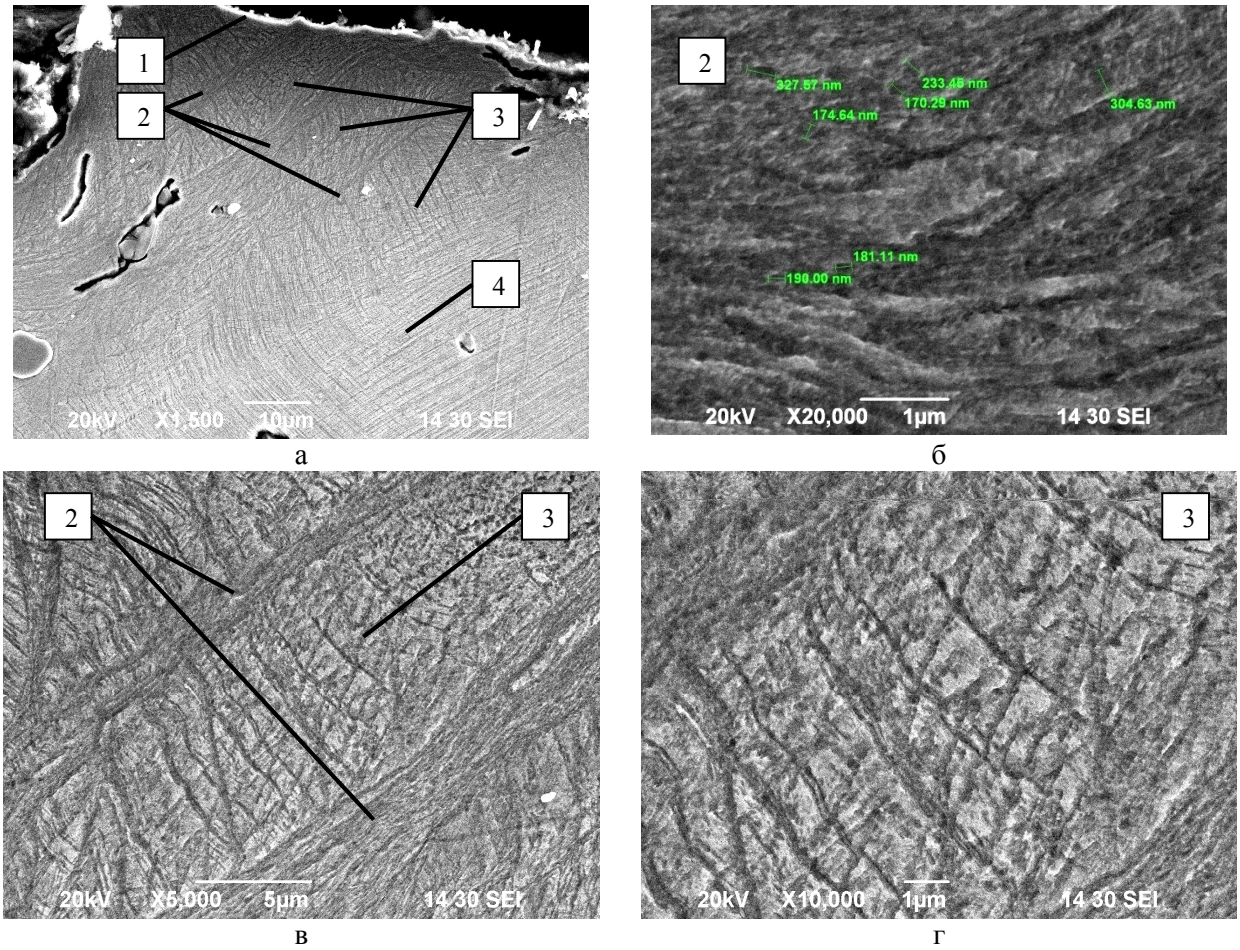


Рис. 7. Поверхность высокомарганцевой стали после ударно-абразивного изнашивания: а – структура упрочнённого слоя высокомарганцевой стали; б – ультрамелкозернистый слой; в – область чередующихся слоёв с деформационным двойникованием и мартенситом; г – слой мартенсита; 1 – ультрамелкое зерно; 2 – переуплотнённый слой деформационных двойников; 3 – слой мартенсита; 4 – слой деформационных двойников с нормальным уплотнением

В ходе ударно-абразивного изнашивания происходит выкрашивание поверхностного слоя, в результате этого идёт постепенная регенерация упрочнённого слоя вглубь стенки изнашиваемой детали.

Таким образом, проведённые исследования ещё раз показывают, что изнашивание высокомарганцевой стали в среде незакреплённых частиц абразива, а также в условиях действия ударных нагрузок является сложным физическим процессом, на интенсивность протекания которого оказывает значительное влияние качественные и количественных параметры микроструктуры, а также энергетический параметр, выраженный через значение энергии дефекта упаковки.

Выводы

1. Энергия дефекта упаковки влияет на износостойкость высокомарганцевой стали. Чем меньше значение ЭДУ, тем выше коэффициент износостойкости стали Гадфильда.

2. Карбиды марганца, присутствующие в структуре высокомарганцевой стали, в процессе абразивного и ударно-абразивного изнашивания разрушаются, оставляя после себя лунки, которые деформируется. Карбиды хрома в результате реализации различных условий изнашивания сохраняют свою целостность вплоть до непосредственного контакта с абразивом, после чего их вырывает с посадочных мест.

3. В процессе абразивного изнашивания упрочнённый слой преимущественно состоит из деформационных двойников аустенита. При воздействии ударных нагрузок упрочнённый слой имеет сложную слоистую структуру, состоящую из области ультрамелкого зерна, областей переуплотнённых деформационных двойников и с нормальным уплотнением, а также мартенсита.

Список литературы

1. Давыдов Н.Г., Благих Б.М., Бигеев А.М. К вопросу повышения качества отливок из высокомарганцевой стали 110Г13Л. Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1972. 139 с.

2. Давыдов Н.Г. Высокомарганцевая сталь. М.: Металлургия, 1979. 176 с.
3. Абразивная износостойкость литых металлов и сплавов / В.М. Колокольцев, Н.М. Мулявко, К.Н. Вдовин и др.; под ред. проф. В.М. Колокольцева. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2004. 228 с.
4. Gumus B., Bal B., Gerstein G., Canadinc D., Maier H.J., Guner F., Elmadagli M. Twinning activities in high-Mn austenitic steels under high-velocity compressive loading // Materials Science and Engineering A. 648 (2015). 104–112.
5. Astafurova E.G., Tukeeva M.S., Zakharova G.G., Melnikov E.V., Maier H.J. The role of twinning on microstructure and mechanical response of severely deformed single crystals of high-manganese austenitic steel // Materials characterization. 6 (2011). 588–592.
6. Astafurova E.G., Tukeeva M.S., Maier G.G., Melnikov E.V., Maier H.J. Microstructure and mechanical response of single-crystalline high-manganese austenitic steels under high-pressure torsion: The effect of stacking-fault energy // Materials Science and Engineering A. 604 (2014). 166–175.
7. Влияние статического и циклического нагружений на мартенситные превращения аустенитной стали 110Г13Л / Клевцов Г.В., Клевцова Н.А., Кукушкин С.С., Кожанова Н.В. // Фундаментальные исследования. 2004. № 5. С. 96.
8. Коршунов Л.Г., Черненко Н.Л. Влияние ε-мартенсита на абразивную износостойкость железомарганцевых сплавов // Физика металлов и металловедение. 2002. № 6. Т. 94. С. 53–61.
9. Коршунов Л.Г. Структурные превращения при трении и износостойкость аустенитных сталей // Физика металлов и металловедение. 1992. № 8. С. 3–21.
10. Коршунов Л.Г., Черненко Н.Л. Структурные превращения при трении и износостойкость сплавов системы Fe – Mn, содержащих ε-мартенсит // Физика металлов и металловедение. 1987. № 8. Т.63. С. 319–328.
11. Виноградов В.Н., Сорокин Г.М., Колокольников М.Г. Абразивное изнашивание. М.: Машиностроение, 1990. 224 с.
12. Виноградов В.Н., Сорокин Г.М. Износостойкость сталей и сплавов. М.: Нефть и газ, 1994. 417 с.
13. Виноградов В.Н., Сорокин Г.М., Албагачиев А.Ю. Изнашивание при ударе. М.: Машиностроение, 1982. 192 с.
14. Вдовин К.Н., Горленко Д.А., Феоктистов Н.А. Исследование энергии дефекта упаковки на абразивную износостойкость отливок из стали Fe-12Mn-1,2C, охлаждённую с различными скоростями // Изв. вузов. Черная металлургия. 2016. № 9. Т. 59. С. 603–609.
15. Wen Y.H., Peng H.B., Si H.T., Xiong R.L., Raabe D. A novel high manganese austenitic steel with higher work hardening capacity and much lower impact deformation than Hadfield manganese steel // Materials and design. 2014. V. 55. P. 798–804.
16. Zambrano O.A., Yesid Aguilar, Jairo Valdés, Rodríguez S.A., Coronado J.J. Effect of normal load on abrasive wear resistance and wear micromechanisms in FeMnAlC alloy and other austenitic steels // Wear. 2016. V. 348–349. P. 61–68.
17. 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 / под общ. ред. Е.В. Протопопова. М., 2015. С. 125–129.
18. Вдовин, К.Н., Горленко Д.А., Феоктистов Н.А. Исследование закономерностей формирования, морфологии и химического состава избыточной фазы в литой высокомарганцовистой стали // Изв. вузов. Черная металлургия. 2016. № 7. Т. 59. С. 491–497.
19. Исследование механических и эксплуатационных свойств высокомарганцевой стали, легированной азотированным ферросплавом / 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.

Поступила 20.03.17.
Принята в печать 27.04.17.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-2-54-62

STUDY OF ABRASIVE AND IMPACT AND ABRASIVE WEAR MECHANISMS OF HIGH MANGANESE STEEL

Valerii M. Kolokoltsev – D.Sc. (Eng.), Professor, Rector
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. ORCID: http://orcid.org/0000-0001-5694-9643

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.), Associate Professor
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. ORCID: http://orcid.org/0000-0002-6091-7983

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

Vitalii K. Dubrovin – D.Sc. (Eng.), Professor
South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.

Abstract
Relevance: When in operation, the parts of mechanisms and units tend to wear out, which determines the useful life of the overall mechanism or unit. The wear rate depends on a number of factors such as the chemical composition of the alloy, microstructure, mechanical properties, as well as on the factors contributing to wear, such as sliding, impact stress, exposure to heat etc. These factors will define the wear mechanisms characteristic of the parts made from different wear resistant alloys including high manganese steel. A closer look at the wear mechanisms will make it possible to, first, understand the role of the alloy microstructure and, secondly, to get an insight into the wear mechanisms typical of high manganese steel under various conditions and to define the role of some alloying elements in these mechanisms. **Objectives:** The objectives include to carry out metallographic tests to

understand the mechanisms of abrasive and impact and abrasive wear in high manganese steel and to analyse the structural transformations taking place in the wear zone. **Methods Applied**: To tackle the task at hand, a number of laboratory experiments were carried out in which high manganese steel specimens were subject to various wear conditions. The resultant wear surfaces were studied using metallographic equipment. **Findings**: Structural change patterns have been identified for high manganese steel under abrasive and impact and abrasive wear conditions; quantitative structural parameters of the alloy have been identified which occur under various wear conditions; the role of the secondary phase in the high manganese steel wear mechanism has been studied under various wear scenarios. The data obtained can give a deeper insight into the processes developing in high manganese steel parts under abrasive and impact and abrasive wear conditions. The data can also be used to determine the adequate chemical composition that can enhance the wear resistance of the steel.

Keywords: High manganese steel, austenite, secondary phase, hardened layer, martensite, deformation twins.

This research was funded by the Russian Science Foundation (Project #15-19-10020).

References

1. Davydov N.G., Blagikh B.M., Bigeev A.M. *K voprosu povysheniya kachestva otlivok iz vysokomargantsevoy stali 110G13L* [On enhancing the quality of castings produced from high manganese steel of the 110G13L grade]. Tomsk: Publishing House of Tomsk University, 1972, 139 p. (In Russ.).
2. Davydov N.G. *Vysokomargantsevaya stal'* [High manganese steel]. Moscow: Metallurgiya, 1979, 176 p. (In Russ.).
3. Kolokoltsev V.M., Mulyavko N.M., Vdovin K.N. et al. *Abrazivnaya iznosostoykost' metallov i splavov* [Abrasive resistance of cast metals and alloys]. Ed. by Professor V.M. Kolokoltsev. Magnitogorsk: Publishing House of Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2004, 228 p. (In Russ.).
4. Gumus B., Bal B., Gerstein G., Canadinc D., Maier H.J., Guner F., Elmadagli M. Twinning activities in high-Mn austenitic steels under high-velocity compressive loading. *Materials Science and Engineering* A. 648 (2015). 104–112.
5. Astafurova E.G., Tukeeva M.S., Zakharova G.G., Melnikov E.V., Maier H.J. The role of twinning on microstructure and mechanical response of severely deformed single crystals of high-manganese austenitic steel. *Materials characterization*. 6 (2011). 588–592.
6. Astafurova E.G., Tukeeva M.S., Maier G.G., Melnikov E.V., Maier H.J., Microstructure and mechanical response of single-crystalline high-manganese austenitic steels under high-pressure torsion: The effect of stacking-fault energy. *Materials Science and Engineering* A. 604 (2014). 166–175.
7. Klevtsov G.V., Klevtsova N.A., Kukushkin S.S., Kozhanova N.V. The impact of static and cyclic loads on martensitic transformations in austenitic steel of the 110G13L grade: Conference abstracts. *Fundamentalnye issledovaniya* [Fundamental research], 2004, no. 5, p. 96. (In Russ.).
8. Korshunov L.G., Chernenko N.L. The effect of ε-martensite on abrasive wear resistance of iron-manganese alloys. *Fizika metallov i metallovedenie* [Physics of metals and physical metallurgy], 2002, no. 6, vol. 94, pp. 53–61. (In Russ.).
9. Korshunov L.G. Structural transformations caused by friction and wear resistance of austenitic steels. *Fizika metallov i metallovedenie* [Physics of metals and physical metallurgy], 1992, no. 8, pp. 3–21. (In Russ.).
10. Korshunov L.G., Chernenko N.L. Structural transformations caused by friction and wear resistance of Fe-Mn alloys containing ε-martensite. *Fizika metallov i metallovedenie* [Physics of metals and physical metallurgy], 1987, no. 8, vol.63, pp. 319–328. (In Russ.).
11. Vinogradov V.N., Sorokin G.M., Kolokolnikov M.G. *Abrazivnoe iznashivanie* [Abrasive wear]. Moscow: Mashinostroenie, 1990, 224 p. (In Russ.).
12. Vinogradov V.N., Sorokin G.M. *Iznosostoykost' staley i splavov* [Wear resistance of steels and alloys]. Moscow: Neft' i gaz, 1994, 417 p. (In Russ.).
13. Vinogradov V.N., Sorokin G.M., Albagachiev A.Yu. *Iznashivanie pri udare* [Impact wear]. Moscow: Mashinostroenie, 1982, 192 p. (In Russ.).
14. Vdovin K.N., Gorlenko D.A., Feoktistov N.A. Studying the impact of stacking fault energy on the abrasive wear resistance of castings made from Fe-12Mn-1.2C steel cooled at different rates. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy* [Proceedings of Russian universities. Ferrous metallurgy], 2016, no. 9, vol. 59, pp. 603–609. (In Russ.).
15. Wen Y.H., Peng H.B., Si H.T., Xiong R.L., Raabe D. A novel high manganese austenitic steel with higher work hardening capacity and much lower impact deformation than Hadfield manganese steel. *Materials and design*. 2014, v. 55, pp. 798–804.
16. Zambrano O.A., Yesid Aguilar, Jairo Valdés, Rodríguez S.A., Coronado J.J. Effect of normal load on abrasive wear resistance and wear micromechanisms in FeMnAlC alloy and other austenitic steels. *Wear*. 2016, v. 348–349, pp. 61–68.
17. Vdovin K.N., Gorlenko D.A., Feoktistov N.A. Studying the impact of the cooling rate within the proeutectoid constituent precipitation interval on the microstructure of Hadfield cast steel. *Metallurgiya: tekhnologii, innovatsii, kachestvo* [Metallurgy: technology, innovations, quality]. Ed. by E.V. Protopopov. Moscow, 2015, pp. 125–129. (In Russ.).
18. Vdovin K.N., Gorlenko D.A., Feoktistov N.A. Studying the forming patterns, morphology and chemical composition of proeutectoid constituents in high manganese cast steel. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy* [Proceedings of Russian universities. Ferrous metallurgy], 2016, no. 7, vol. 59, pp. 491–497. (In Russ.).
19. Kolokoltsev V.M., Vdovin K.N., Chernov V.P., Feoktistov N.A. Gorlenko D.A. Study of the mechanical properties and the 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. (In Russ.).

Received 20/03/17
Accepted 27/04/17

Образец для цитирования

Исследование механизмов абразивного и ударно-абразивного изнашивания высокомарганцевой стали / Колокольцев В.М., Вдовин К.Н., Чернов В.П., Феоктистов Н.А., Горленко Д.А., Дубровин В.К. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2017. Т.15. №2. С. 54–62. https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-2-54-62

For citation

Kolokoltsev V.M., Vdovin K.N., Chernov V.P., Feoktistov N.A., Gorlenko D.A., Dubrovin V.K. Study of abrasive and impact and abrasive wear mechanisms of high manganese steel. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2017, vol. 15, no. 2, pp. 54–62. https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-2-54-62