УДК 669-14

ВЛИЯНИЕ ЭНЕРГИИ ДЕФЕКТА УПАКОВКИ НА АБРАЗИВНУЮ ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ОТЛИВОК ИЗ СТАЛИ Fe–12Mn–1,2C, ОХЛАЖДЕННЫХ С РАЗЛИЧНЫМИ СКОРОСТЯМИ*

Вдовин К.Н., д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Литейное производство и материаловедение» (vdovin@magtu.ru)

Горленко Д.А., к.т.н., ассистент кафедры «Литейное производство и материаловедение» (gorldima@yandex.ru)

Феоктистов Н.А., к.т.н., старший преподаватель кафедры «Литейное производство и материаловедение» (fna87@mail.ru)

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

Аннотация. Рассмотрено влияние скорости охлаждения отливки на ее коэффициент абразивной износостойкости и показано, что износостойкость зависит от величины формирующегося на поверхности износа слоя, упрочненного деформационным двойникованием. Выявлено, что максимальная величина упрочненного слоя отливки образуется как при низких, так и высоких скоростях охлаждения, что связано понижением значения энергии дефекта упаковки (ЭДУ), которая, в свою очередь, меняется в зависимости от концентрации марганца, хрома и кремния. При средней скорости охлаждения степень легированности аустенита становится такой, что происходит увеличение значения ЭДУ. При этом возникает затруднение процесса деформационного двойникования (TWIP) и формирование упрочненного слоя с минимальной толщиной или его полным отсутствием.

Ключевые слова: литая высокомарганцевая сталь, энергия дефекта упаковки, абразивная износостойкость, деформационное двойникование.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-9-603-609

Абразивная износостойкость высокомарганцевых сталей (к числу которых относится сталь Гадфильда) обусловлена постоянным формированием упрочненного слоя на ее поверхности износа. Важной особенностью строения зоны фрикционного контакта является формирование в слоях толщиной 1 – 10 мкм ультрадисперсной структуры (УДС). Это показывает, что основным механизмом деформации слоев толщиной порядка нескольких микрометров является разворот (проскальзывание) фрагментов УДС. Такой ротационный механизм пластичности обеспечивает реализацию в поверхностном слое рассматриваемой толщины чрезвычайно больших величин деформаций [1]. Образующееся при этом большое количество дефектов приводит к упрочнению стали. Дополнительным фактором упрочнения в стали Гадфильда является эффект динамического деформационного старения, который также способствует накоплению высокой плотности дислокаций в стали [2, 3].

Стоит отметить, что для Fe–12Mn–1,2C ГЦК-стали (сталь Гадфильда) двойникование (TWIP) в процессе низкотемпературной деформации (при комнатной температуре) является единственным механизмом упрочнения. Эта сталь полностью сохраняет аустенитную

структуру даже после деформирования сдвигом под давлением до 16 ГПа, при котором реализуется истинная деформация $\varepsilon = 8,4$ [4]. Это связано с достаточно большой величиной энергии дефекта упаковки (ЭДУ), которая зависит от химического состава сплава, температуры деформации, размера зерна аустенита. При такой величине ЭДУ полностью подавляется превращение аустенита в ε - и α -мартенсит (TRIP), которое справедливо для метастабильных аустенитных сталей со значительно более низкими содержанием углерода и/или марганца и значением ЭДУ [2, 5 – 8]. Чрезмерное увеличение значения ЭДУ будет приводить к подавлению TWIP-превращения, а деформация будет проходить за счет скольжения дислокаций (SIP) [3, 9 – 11].

Анализ литературных данных показывает, что различные химические элементы по-разному влияют на величину ЭДУ и их можно разделить на два типа: увеличивающие ее и снижающие. Из всех элементов, входящих в состав Fe–12Mn–1,2C (в числе которых также присутствуют Cr и Si) [12], стоит выделить основной легирующий элемент – марганец. Характер его влияния на величину ЭДУ монотонный: при увеличении концентрации марганца происходит рост этой величины [8, 10, 11, 13 – 16].

Немонотонное влияние на ЭДУ оказывает содержание кремния, который при увеличении концентрации

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

до 3 % увеличивает ЭДУ, а свыше 3 % уменьшает [9]. Содержание углерода в металле несущественно влияет на значение энергии. Проведенные ранее исследования показали, что увеличение содержания углерода от 0,65 до 1,2 % приводит к незначительному снижению энергии дефекта упаковки (менее чем на 3 мДж/м²) [8, 9, 14]. По влиянию хрома в литературе имеются два противоположных мнения: по одним данным хром понижает значение ЭДУ [9], по другим – увеличивает [11].

Однако совместное влияние всех вышеперечисленных элементов на значение ЭДУ в литературе не освещено. Возможно, комплексное воздействие этих химических элементов может значительно отличаться как качественно, так и количественно от индивидуального.

Известно, что на значение энергии дефекта упаковки высокомарганцевой стали прямо пропорционально влияет температура деформации, а размер зерна аустенита – обратно пропорционально [15, 17].

Опубликованные в литературе данные получены, в основном, на модельных сплавах с малой массой, которые в большинстве своем проходят длительный гомогенизирующий отпуск, подвергаются ковке и не имеют температурного градиента по сечению при термической обработке. В реальном производстве литых деталей из высокомарганцевой стали формирование структуры отливок происходит при различных условиях, прежде всего это касается скорости охлаждения во время и после кристаллизации. Также стоит учитывать, что с увеличением габаритов и массы изделий уменьшается их равномерность охлаждения по сечению. В проведенных ранее исследованиях стали Fe–12Mn–1,2C, направленных на изучения ее литой структуры [18, 19], было определено влияние скорости охлаждения на параметры микроструктуры исследуемого сплава. Некоторые из них, в частности размер зерна аустенита, должны оказывать влияние на значение энергии дефекта упаковки.

Целью работы является исследование влияния параметров литой структуры на качественное изменение энергии дефекта упаковки. Это будет способствовать более полному раскрытию природы формирования упрочненного слоя высокомарганцевой стали (в том числе стали Гадфильда) при абразивном износе.

Объектом исследования являлись образцы литой стали Fe–12Mn–1,2C, формирование структуры которых проходило при различных скоростях охлаждения отливки. Скорость охлаждения в интервале кристаллизации менялась от 1,1 до 25 °C/с; в интервале выделения избыточной фазы – от 14,4 до 327,6 °C/мин. Для выявления качественных характеристик микроструктуры использован оптический микроскоп Meiji Techno, а также сканирующий электронный микроскоп JEOL JSM-6490 LV. Микрорентгеноспектральный анализ (МРСА) проведен с использованием приставки к сканирующему микроскопу INCA Energy (Исследования выполнены в ЦКП НИИ Наносталей при ФГБОУ

ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»). Для исключения погрешности при определении химического состава фаз, связанной с высокой чувствительностью оборудования к качеству поверхности, в расчете использовали не абсолютное значение, а отношение железа к другим химическим элементам. Испытание на абразивную износостойкость проведено в соответствии с ГОСТ 23.208-79.

Проведенные ранее исследования показывают, что изменение скорости охлаждения в широком интервале значений влияет на размеры и количество избыточной фазы, а также на размер зерна аустенита [18, 19]. Все это находит отражение в зависимости коэффициента абразивной износостойкости от скорости охлаждения в интервале выделения избыточной фазы (рис. 1).

Формирующаяся при различных скоростях охлаждения сплава во время и после кристаллизации структура имеет ряд отличий. Помимо разницы в размере зерна, аустенит сохраняет различную степень легированности. Для исследования влияния этих параметров на изменение значения ЭДУ, проведено определение средней концентрации марганца, хрома и кремния в аустените в зависимости от скорости охлаждения сплава в интервале выделения избыточной фазы, а также среднего размера аустенитного зерна в зависимости от скорости охлаждения в интервале кристаллизации (рис. 2).

Из полученных зависимостей количества избыточной фазы [19] и концентрации легирующих элементов от скорости охлаждения видно, что с увеличением в структуре доли избыточной фазы среднее количество карбидообразующих элементов (Mn, Cr) в аустените снижается, а от количества кремния увеличивается. Это происходит в результате внутризеренного и межфазного перераспределения химических элементов при карбидообразовании на границах зерен. Средний размер аустенитного зерна имеет обратно пропорциональную зависимость от скорости охлаждения сплава в температурном интервале кристаллизации. Он меняется от

Рис. 1. Зависимость износостойкости высокомарганцевой стали от скорости охлаждения отливки

Fig. 1. Dependence of the wear resistance of high-manganese steel on the cooling rate of the casting

Рис. 2. Зависимость отношения концентрации железа к концентрации марганца (а), хрома (б), кремния (в) в аустените и размера зерна аустенита (г) от скорости охлаждения отливки в соответствующих температурных интервалах

Fig. 2. Dependence of the ratio of iron content and the content of manganese (a), chromium (б), silicon (в) in austenite phase and austenite grain size (г) on the cooling rate of the casting in the respective temperature ranges

270 мкм при скорости охлаждения 1,1 $^\circ\text{C/с}$ до 130 мкм при скорости 25 $^\circ\text{C/с}$.

Исследование зоны абразивного износа показало, что толщина сформированного слоя, упрочненного деформационными двойниками (рис. 3, а), меняется в зависимости от скорости охлаждения сплава и имеет экстремальную зависимость с минимумом (местами менее 3 мкм) при скорости охлаждения 110 – 200 $^\circ\text{C/мин}$. Максимальная толщина упрочненного слоя (до 25 – 30 мкм) формируется в сплаве, полученном при ох-

лаждении с минимальными скоростями (до 15 $^\circ\text{C/мин}$). При скорости охлаждения отливки 200 $^\circ\text{C/мин}$ и выше происходит увеличение размеров формируемого при абразивном износе упрочненного слоя (рис. 3, б).

Уменьшение толщины формирующегося упрочненного слоя свидетельствует о затруднении процесса образования двойников деформации. Причиной этому служит изменение значения ЭДУ, а именно ее увеличение и приближение к верхней границе энергетического интервала TWIP-процесса. При достижении этой

а

б

Рис. 3. Структура сформированного упрочненного слоя, $\times 5000$ (а) и зависимость толщины этого слоя от скорости охлаждения отливки (б)

Fig. 3. The structure of the formed hardened layer, $\times 5000$ (a) and the relationship between the thickness of this layer and the cooling rate of the casting (б)

Рис. 4. Микроструктура сформированного упрочненного слоя, полученная при абразивном износе отливок, охлажденных в интервале выделения избыточной фазы со скоростями: 108 °C/мин (а); 14,4 °C/мин (б), $\times 1000$

Fig. 4. Microstructure of the formed hardened layer obtained in the process of abrasive wear of castings cooled in the range of proeutectoid constituent separation at the following cooling rates: 108 °C/min (a); 14.4 °C/min (b), $\times 1000$

величины деформация идет за счет дислокационного скольжения с отсутствием упрочненного слоя, что было обнаружено при абразивном износе образцов стали, охлажденных со скоростью 110 – 200 °C/мин, в которых упрочненный слой в некоторых местах полностью отсутствовал (рис. 4, а). В связи с этим коэффициент абразивной износостойкости этих образцов минимален (см. рис. 1).

Снижение скорости охлаждения менее 110 °C/мин приводит к постоянному увеличению толщины формирующегося при износе упрочненного слоя. Это говорит о том, что значение ЭДУ с уменьшением скорости охлаждения снижается, а процесс двойникования при деформации проходит более интенсивно. Такое же изменение ЭДУ происходит и при увеличении скорости охлаждения сплава более 200 °C/мин. Однако, сравнивая толщину образовавшихся упрочненных слоев этих образцов видно, что он больше у сплава, сформированного при минимальных скоростях охлаждения из-за наличия избыточной фазы. Она передает энергию деформации более глубоким слоям, тем самым формируя более глубокий упрочненный слой (рис. 4, б).

Другой стороной влияния избыточной фазы является то, что она более износостойкая, чем аустенит, поэтому ее наличие в структуре стали заметно увеличивает коэффициент абразивной износостойкости. Однако она эффективно работает только с размерами от 5 мкм и более. С увеличением скорости охлаждения увеличивается дисперсность и локализация включений избыточной фазы, что в свою очередь влияет на ее закрепленность в металлической матрице. Поэтому, по мере уменьшения размеров избыточной фазы, увеличивается склонность к ее вырыванию из основы (рис. 5). Это также сказывается на величине формирующегося упрочненного слоя – отсутствует механизм упрочнения более глубоких слоев, описанный выше.

Изучив поверхностные слои в зоне абразивного износа, становится ясным, что основную роль в формировании упрочненного слоя играет энергия дефекта упаковки. Это, в свою очередь, влияет на размер формируемой упрочненной зоны и, как следствие, на коэффициент абразивной износостойкости (см. рис. 1), которые хорошо коррелируют между собой и зависят от скорости охлаждения отливок.

С помощью полученных в ходе экспериментов данных об изменении размера зерна аустенита и содержания в нем легирующих элементов можно качественно определить степень влияния каждого параметра на значение ЭДУ в зависимости от скорости охлаждения сплава.

Согласно данным работы [15], значительное снижение энергии соответствует изменению размера зерна аустенита от 5 до 100 мкм. Дальнейшее увеличение раз-

Рис. 5. Микроструктура сформированного упрочненного слоя, полученная при абразивном износе отливки, охлажденной со скоростью 60 °C/мин, $\times 3000$

Fig. 5. Microstructure of the formed hardened layer obtained in the process of abrasive wear of the casting cooled at the rate of 60 °C/min, $\times 3000$

меров зерна аустенита не будет приводить к существенному снижению ЭДУ. Определив средний размер аустенитного зерна в отливках при различных скоростях охлаждения (от 130 до 270 мкм), можно сделать вывод о том, что влияние этого параметра на ЭДУ в исследованных случаях минимально.

В рамках представленной работы исследования влияния температуры при абразивном износе на изменение значения ЭДУ не проведены. Все испытания осуществлены при комнатной температуре, в связи с чем температура поверхности износа не превышала 40 – 50 °С. Исходя из литературных данных [15], заметное увеличение ЭДУ происходит при нагреве до температур порядка 200 °С.

Основное влияние на уровень ЭДУ должен оказывать химический состав аустенита, который зависит от скорости охлаждения отливки. С помощью практических и теоретических данных сформирован условный график влияния марганца, хрома и кремния на качественное изменение значения ЭДУ в зависимости от скорости охлаждения (рис. 6).

Снижение значения ЭДУ в стали способствует более легкому протеканию TWIP-процесса, что косвенно подтверждено в исследовании морфологии сформированного упрочненного слоя поверхности износа сплава, охлажденного с низкими и высокими скоростями. При таких скоростях охлаждения один или несколько химических элементов снижают значение ЭДУ, что делает возможным протекание процесса деформационного двойникования (TWIP). Можно сделать вывод, что при скоростях охлаждения сплава 110 – 200 °С/мин ни один химический элемент не понижает ЭДУ, значение которой находится на верхней энергетической границе TWIP-процесса (а в некоторых случаях и выше), что делает затруднительным, а также невозможным деформационное двойникование. В этом случае деформация протекает путем скольжения дислокаций и не происхо-

дит значительного упрочнения зоны износа, что соответствует минимальному коэффициенту абразивного износа (см. рис. 1).

Авторы склонны считать, что увеличение концентрации хрома приводит к снижению значения ЭДУ. Выводы основаны на результатах работы [20], где показано, что увеличение концентрации хрома в сплаве до 6 % приводит к монотонному повышению его износостойкости. Постоянное снижение значения ЭДУ сначала увеличивает интенсивность процесса деформационного двойникования, а после преодоления минимального порога качественно меняет механизм упрочнения поверхности износа высокомарганцевой стали. При этом становится возможным превращение аустенита в ϵ -мартенсит (TRIP). Если влияние хрома было бы противоположно (увеличение значения ЭДУ), то, согласно полученным в этой работе данным, в стали не должно наблюдаться монотонное повышение износостойкости.

Выводы. Основное влияние на значение энергии дефекта упаковки литой Fe–12Mn–1,2C стали оказывает концентрация марганца, хрома и кремния, которая в свою очередь зависит от скорости охлаждения отливки.

При медленных (до 60 °С/мин) и высоких (более 200 °С/мин) скоростях охлаждения отливки один или несколько химических элементов снижают значение ЭДУ, что способствует упрочнению за счет TWIP-процесса. В интервале скоростей охлаждения отливки от 110 до 200 °С/мин ни один химический элемент не снижает значения ЭДУ, а процесс деформации идет за счет скольжения дислокаций без значительного упрочнения поверхности износа.

На коэффициент абразивной износостойкости высокомарганцевой стали оказывает влияние размер формирующегося упрочненного слоя, который, в свою очередь, определяется значением ЭДУ и имеет экстремальную зависимость от скорости охлаждения отливки с минимальным значением в интервале 110 – 200 °С/мин.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Коршунов Л.Г. Структурные превращения при трении и износостойкость аустенитных сталей // Физика металлов и металловедение. 1992. № 8. С. 3 – 21.
2. Теплов В.А., Коршунов Л.Г., Шабашов В.А. и др. Структурные превращения высокомарганцевистых аустенитных сталей при деформировании сдвигом под давлением // Физика металлов и металловедение. 1988. Т. 66. № 3. С. 563 – 571.
3. Астафурова Е.Г., Тукеева М.С., Майер Г.Г. и др. Влияние энергии дефекта упаковки на закономерности развития механического двойникования в высокомарганцевых аустенитных сталях Fe-Mn-Al-C при кручении под давлением // Письма о материалах. 2013. Т. 3. С. 198 – 201.
4. Штремель М.А., Коваленко И.А. О механизме упрочнения стали Гадфильда // Физика металлов и металловедение. 1987. Т. 63. № 1. С. 172 – 180.
5. Cherdymtsev V. V., Pustov L. Yu., Kaloshkin S. D. etc. Phase transformations during deformation of Fe-Ni and Fe-Mn alloys produced by mechanical alloying // The Physics of Metals and Metallography. 2007. Vol. 104. Issue 4. P. 408 – 414.

Рис. 6. Качественная зависимость значения ЭДУ от химического элемента и скорости охлаждения отливки:
1 – Mn; 2 – Cr; 3 – Si

Fig. 6. Qualitative dependence between the values of SFE of the chemical element and the cooling rate of the casting:
1 – Mn; 2 – Cr; 3 – Si

6. Терещенко Н.А., Уваров А.И., Вильданова Н.Ф. Роль деформационных двойников в формировании механических свойств аустенитных сталей на Cr-Mn основе // *Физика металлов и металловедение*. 2003. Т. 95. № 4. С. 78 – 86.
7. Пустов Л.Ю., Эстрин Э.И., Калошкин С.Д. и др. Особенности фазовых превращений в богатых железом Fe-Mn сплавах, полученных методом механосплавления // *Физика металлов и металловедение*. 2003. Т. 95. № 6. С. 71 – 79.
8. Grässel O., Frommeyer G., Derder C., Hofmann H. Phase Transformations and Mechanical Properties of Fe-Mn-Si-Al TRIP-Steels // *Journal de Physique IV*. 1997. Vol. 07 (C5). P. C5-383 – C5-388.
9. Kriangyut Phiu-on. Deformation mechanisms and mechanical properties of hot rolled Fe-Mn-C-(Al)-(Si) austenitic steels: Dissertation vorgelegt von Master of Engineering. – Thailand, 2008. – 154 p.
10. Medvedeva N.I., Park M.S., Van Aken D.C., Medvedeva J.E. First-principles study of Mn, Al and C distribution and their effect on stacking fault energies in fcc Fe // *Journal of Alloys and Compounds*. 2014. Vol. 582. P. 475 – 482.
11. Atef Saad Hamada. Manufacturing, mechanical properties and corrosion behavior of high-Mn TWIP steels. – Oulu: Oulu University press, 2007. – 54 p.
12. Vdovin K.N., Feoktistov N.A., Sinitskii E.V. etc. Production of HighManganese Steel in Arc Furnaces. Part 1. // *Steel in translation*. 2015. Vol. 45. No. 10. P. 729 – 732.
13. Pierce D.T., Jiménez J.A., Bentley J. etc. The influence of manganese content on the stacking fault and austenite/ε-martensite interfacial energies in Fe–Mn–(Al–Si) steels investigated by experiment and theory // *Acta Materialia*. 2014. Vol. 68. P. 238 – 253.
14. Mazancová Eva, Schindler Ivo, Mazanec Karel. Stacking fault energy analysis from point of view of plasticdeformation response of the twip and triplex alloys. In.: *Zborník z 18. Medzinárodná konferencia metalurgie a materiálov*. – Ostrava: TANGER, 2009. P. 32 – 39.
15. Saeed-Akbari A., Mosecker L., Schwedt A., Bleck W. Characterization and Prediction of Flow Behavior in High-Manganese Twinning Induced Plasticity Steels: Part I. Mechanism Maps and Work-Hardening Behavior // *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2012. Vol. 43. Issue 5. P. 1688 – 1704.
16. Saeed-Akbari A., Imlau J., Prah U., Bleck W. Derivation and Variation in Composition-Dependent Stacking Fault Energy Maps Based on Subregular Solution Model in High-Manganese Steels // *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2009. Vol. 40. Issue 13. P. 3076 – 3090.
17. Волосевич П. Ю., Гриднев В. Н., Петров Ю. Н. Влияние марганца на энергию дефекта упаковки в сплавах железо-марганец // *Физика металлов и металловедение*. 1976. Т. 42. № 2. С. 372 – 376.
18. Вдовин К.Н., Горленко Д.А., Никитенко О.А., Феоктистов Н.А. Исследование влияния скорости охлаждения при кристаллизации на размер аустенитного зерна литой стали 110Г13Л // *Международный научно-исследовательский журнал*. 2015. № 10-2 (41). С. 28 – 31.
19. Вдовин К.Н., Горленко Д.А., Феоктистов Н.А. Исследование влияния скорости охлаждения в интервале выделения избыточных фаз на литую микроструктуру стали Гадфильда. – В сб.: *Металлургия: технологии, инновации, качество. «Металлургия – 2015»*. Тр. XIX Междунар. науч.-практич. конф. 15–16 декабря 2015 г., Новокузнецк. – Новокузнецк: Изд-во СибГИУ, 2015. С. 125 – 129.
20. 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.

Поступила 24 февраля 2016 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2016. Vol. 59. No. 9, pp. 603–609.

INFLUENCE OF STACKING-FAULT ENERGY ON ABRASIVE WEAR RESISTANCE OF CASTINGS FROM Fe–12Mn–1.2C STEEL COOLED WITH DIFFERENT RATES

K.N. Vdovin, D.A. Gorlenko, N.A. Feoktistov

Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov, Magnitogorsk, Russia

Abstract. The research group has investigated the influence of the cooling rate of a casting on the coefficient of abrasive wear resistance and has proved that wear resistance is determined by the thickness of the layer hardened by twinning-induced plasticity, which is formed on the wearing surface. It was found that the maximum thickness of the hardened layer is formed both at high and at low cooling rates, which is connected with the decrease in the value of the stacking-fault energy (SFE). This value, in its turn, varies depending on the content of manganese, chromium and silicon. At medium cooling rate the achieved doping level of austenite results in the increase of the SFE value. It also hampers the process of twinning-induced plasticity (TWIP) and results in forming of a hardened layer of minimum thickness or this layer is not formed at all.

Keywords: cast high-manganese steel, stacking-fault energy, abrasive wear resistance, twinning-induced plasticity.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-9-603-609

REFERENCES

1. Korshunov L.G. Structure transformations during friction and wear resistance of austenitic steels. *Fizika metallov i metallovedenie*. 1992, no. 8, pp. 3–21. (In Russ.).
2. Teplov V.A., Korshunov L.G., Shabashov V.A., Kuznetsov R.I., Pilyugin V.P., Tupitsa D.I. Structural transformations of high-manganese austenitic steels during deformation by shear under pressure. *Physics of Metals and Metallography*. 1988, vol. 66, no. 3, pp. 135–143.
3. Astafurova E.G., Tukeeva M.S., Maier G.G., Mel'nikov E.V., Koshovkina V.S., Kozlova T.A. The effect of stacking-fault energy on the peculiarities of mechanical twinning development in high-manganese austenitic Fe-Mn-Al-C steels under high-pressure torsion. *Pis'ma o materialakh*. 2013, vol. 3, pp. 198–201. (In Russ.).
4. Shtremel' M.A., Kovalenko I.A. On the mechanism of hardening of Hadfield steel. *Fizika metallov i metallovedenie*. 1987, vol. 63, no. 1, pp. 172–180. (In Russ.).
5. Cherdyn'tsev V.V., Pustov L.Yu., Kaloshkin S.D., Tomilin I.A., Shelekhov E.V., Laptev A.I., Baldokhin Yu.V., Estrin E.I. Phase transformations during deformation of Fe-Ni and Fe-Mn alloys produced by mechanical alloying. *The Physics of Metals and Metallography*. 2007, vol. 104, Issue 4, pp. 408 – 414. DOI: 10.1134/S0031918X07100109.
6. Tereshchenko N.A., Uvarov A.I., Vil'danova N.F. The role of deformation twins in the formation of the mechanical properties of Cr-Mn-based austenitic steels. *Physics of Metals and Metallography*. 2003, vol. 95, no. 4, pp. 371–378.
7. Pustov L.Yu., Estrin E.I., Kaloshkin S.D., Cherdyn'tsev V.V., Shelekhov E.V., Tomilin I.A. Phase transformations in iron-rich Fe-Mn alloys obtained by mechanical alloying. *Physics of Metals and Metallography*. 2003, vol. 95, no. 6, pp. 575–583.

8. Grässel O., Frommeyer G., Derder C., Hofmann H. Phase Transformations and Mechanical Properties of Fe-Mn-Si-Al TRIP-Steels. *Journal de Physique IV*. 1997, vol. 07 (C5), pp. C5-383–C5-388. DOI: 10.1051/jp4:1997560.
9. Kriangyut Phiu-on. *Deformation mechanisms and mechanical properties of hot rolled Fe-Mn-C-(Al)-(Si) austenitic steels: Dissertation vorgelegt von Master of Engineering*. Samutprakan, Thailand, 2008, 154 p.
10. Medvedeva N.I., Park M.S., Van Aken D.C., Medvedeva J.E. First-principles study of Mn, Al and C distribution and their effect on stacking fault energies in fcc Fe. *Journal of Alloys and Compounds*. 2014, vol. 582, pp. 475–482. DOI: 10.1016/j.jallcom.2013.08.089.
11. Atef Saad Hamada. *Manufacturing, mechanical properties and corrosion behavior of high-Mn TWIP steels*. Oulu: Oulu University press, 2007, 54 p.
12. Vdovin K.N., Feoktistov N.A., Sinitskii E.V., Gorlenko D.A., Durov N.M. Production of high-manganese steel in arc furnaces. Part 1. *Steel in Translation*. 2015, vol. 45, no. 10, pp. 729–732. DOI: 10.3103/S0967091215100186.
13. Pierce D.T., Jiménez J.A., Bentley J., Raabe D., Oskay C., Wittig J.E. The influence of manganese content on the stacking fault and austenite/ ϵ -martensite interfacial energies in Fe–Mn–(Al–Si) steels investigated by experiment and theory. *Acta Materialia*. 2014, vol. 68, pp. 238–253. DOI: 10.1016/j.actamat.2014.01.001.
14. Mazancová Eva, Schindler Ivo, Mazanec Karel. Stacking fault energy analysis from point of view of plastic deformation response of the twip and triplex alloys. In: *Zborník z 18. medzinárodnej konferencie metalurgie a materiálov*. Ostrava: TANGER, 2009, pp. 32–39.
15. Saeed-Akbari A., Mosecker L., Schwedt A., Bleck W. Characterization and Prediction of Flow Behavior in High-Manganese Twinning Induced Plasticity Steels: Part I. Mechanism Maps and Work-Hardening Behavior. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2012, vol. 43, Issue 5, pp. 1688–1704. DOI: 10.1007/s11661-011-0993-4.
16. Saeed-Akbari A., Imlau J., Prah U., Bleck W. Derivation and Variation in Composition-Dependent Stacking Fault Energy Maps Based on Subregular Solution Model in High-Manganese Steels. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2009, vol. 40, Issue 13, pp. 3076–3090. DOI: 10.1007/s11661-009-0050-8.
17. Volosevich P. Yu., Gridnev V. N., Petrov Yu. N. Effect of manganese on the stacking-fault energy in the iron-manganese alloys. *Fizika metallov i metallovedenie*. 1976, vol. 42, no. 2, pp. 372–376. (In Russ.).
18. Vdovin K.N., Gorlenko D.A., Nikitenko O.A., Feoktistov N.A. Investigation of the effect of cooling rate during crystallization on austenite grain size of the cast steel 110G13L. *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal*. 2015, no. 10-2 (41), pp. 28–31. (In Russ.).
19. Vdovin K.N., Gorlenko D.A., Feoktistov N.A. Study of the effect of cooling rate in interval of excessive phases generating on cast Hadfield steel microstructure. In: *Metallurgiya: tekhnologii, innovatsii, kachestvo. "Metallurgiya – 2015". Trudy XIX Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii 15 – 16 dekabrya 2015 g., Novokuznetsk* [Metallurgy: technologies, innovation, quality. "Metallurgy – 2015". Proceedings of the XIX Int. scientific-practical conference on December 15 – 16, 2015, Novokuznetsk]. Novokuznetsk: izd. SibGIU, 2015, pp. 125–129. (In Russ.).
20. Kolokol'tsev V.M., Dolgopolova L.B., Mulyavko N.M. Effect of chemical composition on the structure and properties of chromium-manganese austenitic steels. *Liteinye protsessy*. 2003, no. 3, pp. 31–36. (In Russ.).

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

Information about the authors:

K.N. Vdovin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Chair "Materials Science and Foundry" (vdovin@magtu.ru)

D.A. Gorlenko, Cand. Sci. (Eng.), Assistant of the Chair "Materials Science and Foundry" (gorldima@yandex.ru)

N.A. Feoktistov, Cand. Sci. (Eng.), Senior Lecturer of the Chair "Materials Science and Foundry" (fna87@mail.ru)

Received February 24, 2016