

УДК 669.15:539.12.04:620.186.1

*С.В. Горбунов¹, С.В. Воробьев¹, Ю.Ф. Иванов²,
Ю.А. Колубаева³, А.Д. Тересов³*

¹ Сибирский государственный индустриальный университет

² Томский государственный архитектурно-строительный университет

³ Институт сильноточной электроники СО РАН

ВЛИЯНИЕ ВЫСОКОИНТЕНСИВНОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРНО-ФАЗОВОЕ СОСТОЯНИЕ ПОВЕРХНОСТИ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ¹

Все более жесткими становятся требования к свойствам конструкционных материалов для отраслей промышленности, отличающихся крайне неблагоприятными, экстремальными условиями эксплуатации ответственных деталей, элементов конструкций и агрегатов. Вместе с тем резервы повышения эксплуатационных характеристик материалов традиционными способами практически исчерпаны [1, 2].

В этой связи вполне закономерен все возрастающий интерес к композиционным материалам и металлам с градиентной структурой, которые обладают новыми, ранее недоступными свойствами. Эти свойства формируются в условиях дифференцированных обработок различного типа, когда внешнее энергетическое воздействие не распределяется равномерно по объему заготовки, а локализуется на поверхности [3 – 5].

В настоящее время разработаны новые методы внешних энергетических воздействий, позволяющие повышать важные для потребителя физико-механические свойства сталей и сплавов. Однако физическая природа процессов, протекающих при формировании и последующей эволюции градиентных структурно-фазовых состояний, мало изучена; соответствующее научное направление находится на стадии интенсивного накопления и осмысления фактического материала [5, 6].

Низкоэнергетические импульсные сильноточные электронные пучки, обеспечивающие регулируемую в широком диапазоне плотность энергии на поверхности облучаемого материала, являются в настоящее время одним из высокоэффективных методов формирования градиентного структурно-фазового состояния в металлах и сплавах [7, 8].

Целью настоящей работы являлось исследование физической природы градиентной структуры, формирующейся в поверхностном слое нержавеющей стали, обработанной высокоинтенсивным электронным пучком.

Работа является продолжением исследований [9]. В качестве материала исследования использована сталь 08X18H10T после закалки в воде от 1000 °С.

Режим электронно-пучковой обработки: энергия электронов $U = 18$ кэВ; длительность импульса воздействия пучка электронов $\tau = 50$ мкс; количество импульсов воздействия $N = 3$; частота следования импульсов $f = 0,3$ с⁻¹; плотность энергии пучка электронов $E_s = 25$ Дж/см². Выбранный режим электронно-пучковой обработки соответствовал плавлению поверхностного слоя толщиной 3 – 5 мкм. Плотность энергии пучка электронов 15 Дж/см² [9] соответствует предплавленному состоянию поверхности.

Для выявления градиентного характера структуры стали исследовали состояние фольг, расположенных на расстоянии 10 и 80 мкм от поверхности обработки, и фольг, полученных из прилегающего к поверхности обработки слоя.

Электронно-пучковое облучение стали при использовании в работе режиме воздействия приводит к модификации структуры образца на глубину приблизительно 150 мкм, поэтому за структуру исходного состояния стали принимается состояние удаленного слоя (глубина приблизительно 200 мкм).

Методики количественного анализа электронно-микроскопических изображений не отличались от описанных в работе [9].

Электронно-пучковая обработка стали 08X18H10T приводит, как и в работе [9], к формированию в поверхностном слое толщиной до 5 мкм структуры дендритной (ячеистой) кристаллизации (рис. 1, а). Ячейки кристаллизации имеют равноосную форму, средние размеры D ячеек составляют 320 нм (рис. 2).

Вдоль границ дендритов выявлены частицы второй фазы (на рис. 1, б частицы указаны стрелками), а именно, частицы карбида титана состава TiC и частицы соединения Cr₁₅Fe₉. Частицы имеют округлую форму, средние размеры составляют 18,5 нм (размеры реальных частиц изменяются в пределах 3,0 – 50,0 нм). В объеме ячеек кристаллизации выявляются дислокации, распределенные хаотически. Скалярная плотность дислокаций $3,6 \cdot 10^{10}$ см⁻². Микродвойники в ячейках кристаллизации не выявлены.

¹ Работа выполнена при частичной финансовой поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009 – 2013 гг.» (гос. контракт № 02.740.11.0538), совместного проекта фундаментальных исследований НАН Беларуси и СО РАН № 7 и проекта ПП27/09 Программы Президиума РАН.

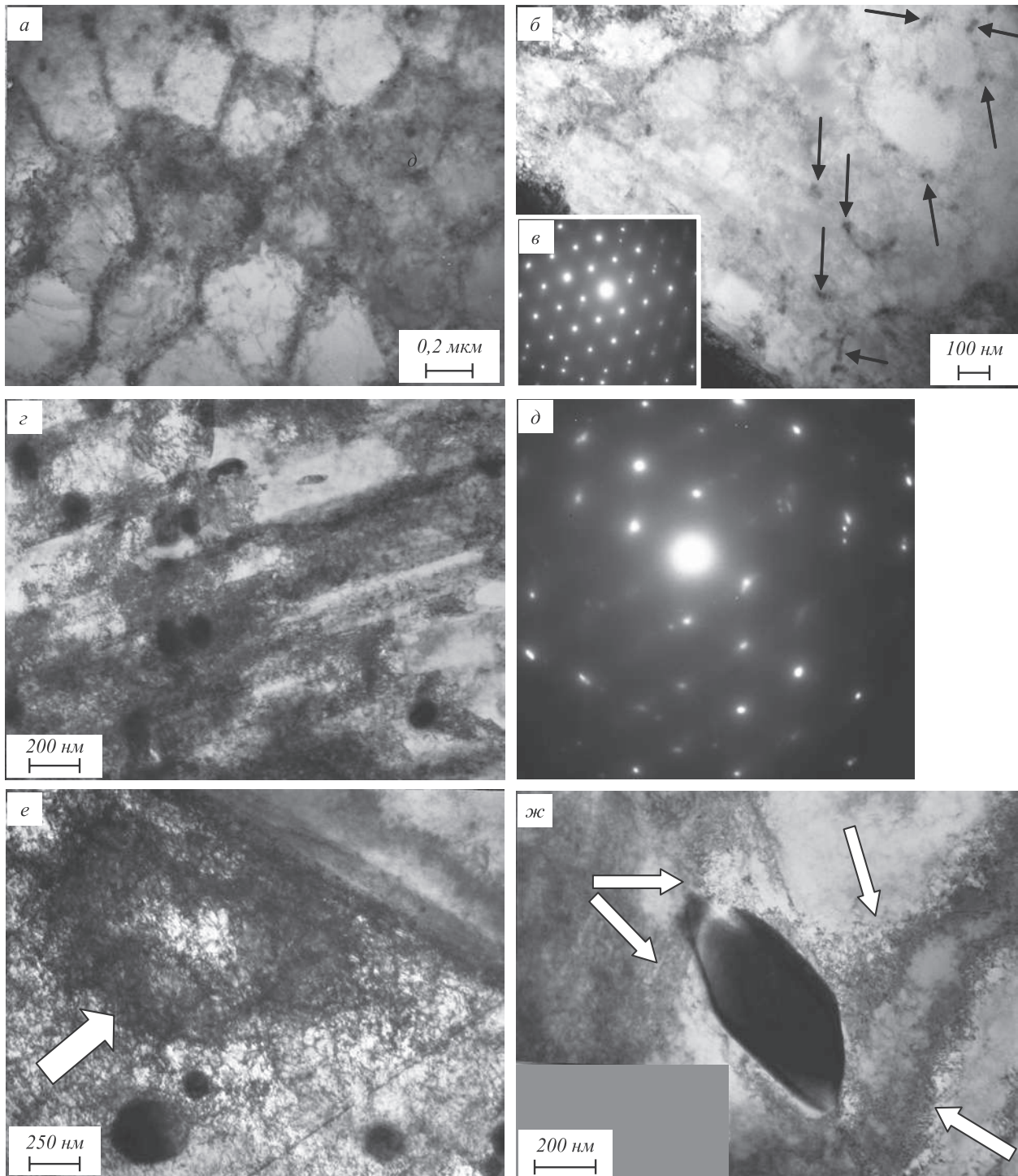


Рис. 1. Электронно-микроскопические изображения структуры стали 08X18N10T после обработки электронным пучком: *а* – структура ячеистой кристаллизации; *б* и *в* – частицы второй фазы (указаны стрелками) и микроэлектроннограмма; *г* и *д* – разориентированные области структуры и микроэлектроннограмма; *е* и *ж* – изгибные экстинкционные контуры (указаны стрелками)

Слой со структурой дендритной кристаллизации переходит в объем материала с поликристаллической структурой. Средний размер зерен, выявленных путем травления поверхности облучения, составляет 9,4 мкм (рис. 2), что меньше размеров зерен в стали в исходном состоянии [9]. В объеме зерен выявляются микродвойники деформационного происхождения и дислокационная субструктура в виде хаоса и сеток.

Микродвойникование стали, как правило, приводит к формированию в разделяющих микродвойники объемах разориентированных областей (областей, различающихся контрастом, далее «фрагментов») (рис. 1, *г*). Средние размеры фрагментов с увеличением расстояния от поверхности облучения изменяются немонотонным образом, достигая минимального значения в слое, расположенном на глубине приблизительно 10 мкм.

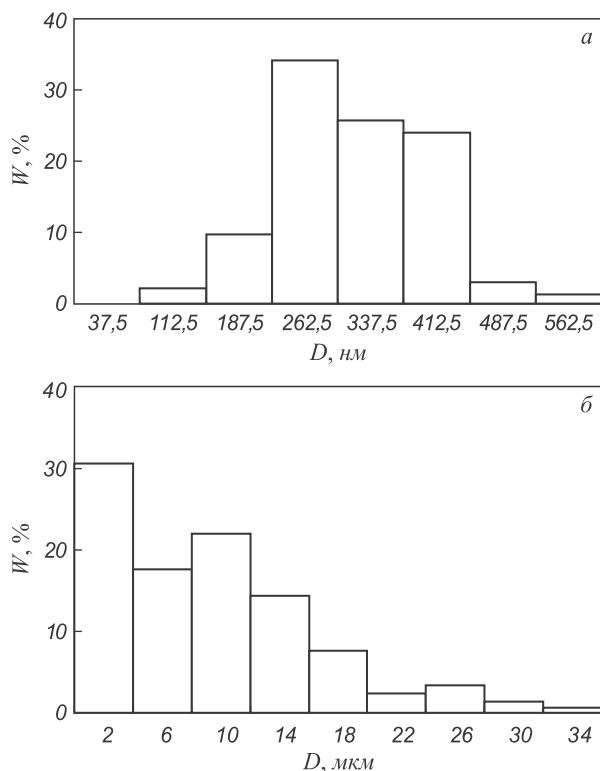


Рис. 2. Гистограммы распределения ячеек кристаллизации (а) и зерен (б) при $E_s = 25$ Дж/см²

Рефлексы, формирующие микроэлектроннограммы, полученные с фрагментированной структуры, имеют азимутальное расщепление (рис. 1, д).

Сверхвысокие скорости нагрева и охлаждения стали, реализующиеся при электронно-пучковой обработке, приводят к формированию в поверхностном слое термических полей напряжений, искажающих кристаллическую решетку материала. Изготовление тонких фольг, являющихся объектом электронно-микроскопических исследований, сопровождается короблением тонких участков фольги под действием остаточных термических напряжений. Возникающий при этом изгиб-кручение кристаллической решетки материала на электронно-микроскопических изображениях структуры тонкой фольги проявляется в виде изгибных экстинкционных контуров [10]. Выполненные исследования показали, что изгибные экстинкционные контуры начинаются и заканчиваются у границ зерен и микродвойников (рис. 1, е), частиц карбидной фазы (рис. 1, ж). Следовательно, источниками напряжений являются внутрифазные границы раздела (границы раздела микродвойников и зерен) и межфазные границы раздела (границы раздела матрица – карбидная частица).

Как отмечалось выше, электронно-пучковая обработка стали при плотности энергии пучка электронов 25 Дж/см² приводит к плавлению поверхностного слоя.

Это, в свою очередь, сопровождается растворением частиц первичной карбидной фазы (частиц типа $Me_{23}C_6$, присутствующих в стали в исходном состоянии). По мере приближения к поверхности облучения средние размеры и плотность (число частиц на единице площади) частиц снижаются.

Выводы. Электронно-пучковая обработка в режиме плавления поверхности образца сопровождается существенным изменением структурно-фазового состояния приповерхностного слоя материала, заключающемся в формировании в поверхностном слое структуры дендритной кристаллизации размеров субмикронного диапазона, обусловленной сверхвысокими скоростями кристаллизации расплавленного слоя; в протекании в подповерхностном слое процесса динамической рекристаллизации, инициированного сверхвысокими скоростями нагрева и охлаждения, реализующимися при электронно-пучковой обработке материала, и приводящего к существенному уменьшению (примерно в два раза) среднего размера зерна; в полном растворении частиц исходной карбидной фазы и выделении наноразмерных частиц вторых фаз.

Авторы выражают благодарность В.Е. Громову, С.В. Коновалову за обсуждение работы и критические замечания.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Перспективные промышленные технологии и материалы / Под ред. В.Е. Громова, С.М. Кулакова. – Новосибирск: Наука, 2004. – 604 с.
2. Бердышев В.А., Козлов Э.В., Громов В.Е. Градиентные структурно-фазовые состояния в рельсовой стали. – М.: Недра, 2000. – 175 с.
3. Градиентные структуры в перлитной стали / Э.В. Козлов, В.Е. Громов, В.В. Коваленко и др. – Новокузнецк: изд. СибГИУ, 2004. – 200 с.
4. Громов В.Е. – В кн.: Прочность, пластичность и разрушение. Сборник статей, посвященный 25-летию ЛФП ИФПМ СО РАН. – Томск: Изд-во НТЛ, 2009. С. 105 – 115.
5. Физическая природа формирования и эволюции градиентных структурно-фазовых состояний в сталях и сплавах / В.В. Коваленко, Э.В. Козлов, Ю.Ф. Иванов, В.Е. Громов. – Новокузнецк: Изд-во Полиграфист, 2009. – 557 с.
6. Основы технологии обработки поверхности материалов импульсной гетерогенной плазмой / Е.А. Будовских, В.Д. Сарычев, В.Е. Громов и др. – Новокузнецк: изд. СибГИУ, 2002. – 170 с.
7. Коваль Н.Н., Иванов Ю.Ф. // Изв. вуз. Физика. 2008. № 5. С. 60 – 70.
8. Rotshtein V., Ivanov Yu., Markov A. – In Book: “Materials surface processing by directed energy techniques”. Ed. by Y. Pauleau: Elsevier. – 2006. P. 205 – 240.
9. Горбунов С.В., Иванов Ю.Ф., Воробьев С.В. и др. // Изв. вуз. Черная металлургия. 2011. № 2. С. 33 – 35.
10. Утевский Л.М. Дифракционная электронная микроскопия в металловедении. – М.: Металлургия, 1973. – 584 с.

© 2012 г. С.В. Горбунов, С.В. Воробьев, Ю.Ф. Иванов, Ю.А. Колубаева, А.Д. Тересов
Поступила 16 августа 2011 г.