

переключение химических связей по схеме сдвиг – поворот на атомных масштабах [19]. Полученные результаты являются доказательством того, что для переключения химических связей и формирования новых фаз в системах, образованных нерастворимыми друг в друге компонентами, необходимо, чтобы система обладала ограниченным свободным объемом при реализации механизма сдвиг – поворот на атомных масштабах. Реализация механизма сдвиг – поворот на мезоскопических масштабах может быть следствием кооперативных движений атомов, рассмотренных авторами теории зон сдвиговой трансформации.

**Выводы.** Исследованы процессы структурообразования на границе раздела практически нерастворимых друг в друге компонентов железа и меди при различных условиях приложения динамической нагрузки. Обнаружено, что в случае взаимодействия кумулятивной медной струи со стальным стержнем происходит образование твердых растворов замещения на основе ГЦК решеток железа и меди соответственно в более широких областях, чем это возможно по диаграмме фазовых равновесий. При взаимодействии твердофазных образцов стали и меди, подвергнутых совместной осадке, могут формироваться продукты механохимических реакций, имеющих структуру, отличную от структуры исходных компонентов.

Авторы благодарят Г.А. Швецова и А.Д. Матросова (Институт гидродинамики СО РАН) за любезно предоставленные образцы и полезные обсуждения.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рашников С.Ф., Щербо Ю.А., Ситников И.В. и др. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета. 2006. № 4. С. 52 – 54.

2. Вдовин К.Н., Кольга М.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета. 2010. № 4. С. 33 – 35.
3. Григорьева Т.Ф., Барина А.П., Ляхов Н.З. Механохимический синтез в металлических системах. – Новосибирск: Параллель, 2008. – 312 с.
4. Sauvage X. Mechanical alloying of Cu and Fe induced by severe plastic deformation of a Cu-Fe composite // Acta Materialia. 2005. Vol. 53. P. 2127 – 2135.
5. Журков С.Н., Санфилова Т.П. // ЖТФ. 1958. Т. 28. С. 1719 – 1726.
6. Takacs L. // J. Met. 2000. № 52. P. 12, 13.
7. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория упругости. – М.: Наука, 1965, – 202 с.
8. Falk M.L., Langer J.S. Shear transformation zone theory elasto-plastic transition in amorphous solids // Phys. Rev. 1998. Vol. E57. P. 7192 – 7204.
9. Lemaître A., Carlson J. Boundary lubrication with a glassy interface // Phys. Rev. 2004. Vol. E69. P. 061611 (1 – 18).
10. Маркидонов А.В., Старостенков М.Д., Барчук А.А., Медведев Н.Н. // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2011. Т. 8. № 3. С. 83 – 88.
11. Сандитов Д.С. // ДАН. 2003. Т. 390. № 2. С. 209 – 213.
12. Диаграммы состояния двойных металлических систем. Т. 2. / Под ред. Н.П. Лякишева. – М.: Машиностроение, 1997. – 1024 с.
13. Швецов Г.А., Матросов А.Д. // Прикладная механика и техническая физика. 2004. № 2. С. 147 – 155.
14. Reppelhoff W. // Phys. Rev. 1994. Vol. 49. P. 6012 – 6017.
15. Орленко Л.П. Физика взрыва и удара. – М.: Физматлит, 2006. – 304 с.
16. Панин В.Е., Егорушкин В.Е. // Физическая мезомеханика. 2008. Т. 11. № 2. С. 9 – 30.
17. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. – М.: Физматлит, 2008. – 656 с.
18. Родунер Э. Размерные эффекты в наноматериалах. – М.: Техносфера, 2010. – 268 с.
19. Томпсон Д.М. Неустойчивости и катастрофы в науке и технике. – М.: Мир, 1985. – 289 с.

© 2012 г. Р.Б. Абылкалыкова,  
Л.И. Квеглис, Ф.М. Носков  
Поступила 10 апреля 2012 г.

УДК 669.04:539.097:539.376

**В.В. Сизов<sup>1</sup>, В.Е. Громов<sup>1</sup>, Ю.Ф. Иванов<sup>2</sup>,  
С.В. Воробьев<sup>1</sup>, С.В. Коновалов<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Сибирский государственный индустриальный университет  
<sup>2</sup> Институт сильноточной электроники СО РАН

## ЭВОЛЮЦИЯ ЗЕРЕННОЙ СТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ СТАЛИ 20Х23Н18, ПОДВЕРГНУТОЙ ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ ОБРАБОТКЕ И МНОГОЦИКЛОВОМУ НАГРУЖЕНИЮ\*

подавляющее большинство сталей, используемых в промышленности, находится в поликристаллическом

\* Работа выполнена при частичной финансовой поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009 – 2013 гг.» (гос. контракт № 02.740.11.0538), гранта президиума РАН (проект № 27.4) и Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 12-02-00092а).

состоянии. Важнейшими, существенно влияющими на свойства параметрами зеренной структуры, формирующейся в материале при различных способах обработки, являются средний размер зерен, степень совершенства зерен, характер и степень разнотекстурности материала, наличие и характер текстуры, степень неравноосности зерен [1, 2]. Развитие техники постоянно выдвигает

вопросы повышения требований к материалам, эксплуатирующимся в условиях циклических нагрузок. Повышение усталостной долговечности нержавеющих сталей и, соответственно, безопасных сроков эксплуатации изделий из них, может быть достигнуто путем электронно-пучковой обработки [3 – 6].

Целью настоящей работы является анализ состояния зеренной структуры стали 20Х23Н18, формирующейся в поверхностном слое в результате облучения высокоинтенсивным низкоэнергетическим электронным пучком, и ее эволюции при последующих усталостных испытаниях до разрушения.

В настоящей работе исследована сталь аустенитного класса 20Х23Н18 [7]. Предварительная термическая обработка стали заключалась в охлаждении образцов на воздухе после выдержки в течение 2 ч при температуре 1150 °С. Усталостные испытания проводили на специальной установке для асимметричного консольного изгиба. Параметры испытаний: напряжение нагрузки 20 МПа, частота повторения 20 Гц, температура 293 К; число циклов до разрушения составляло примерно  $1,5 \cdot 10^5$ . Форма и размеры образцов для усталостных испытаний не отличались от описанных в работах [3 – 6, 8]. Образцы (как и в работах [3 – 6, 8]) имели концентратор напряжений в виде выреза полуокружностью радиусом 10 мм. Перед усталостными испытаниями часть образцов подвергали облучению высокоинтенсивным низкоэнергетическим электронным пучком на установке «СОЛО» (Институт сильноточной электроники СО РАН) [9]. Параметры обработки: энергия электронов 18 кэВ; плотность энергии пучка электронов ( $E_s$ ) 20 и 30 Дж/см<sup>2</sup> при длительности импульса воздействия ( $t$ ) 50 мкс (режимы 1 и 2), 40 Дж/см<sup>2</sup> при длительности импульса воздействия 150 мкс (режим 3);

плотность мощности пучка электронов  $W_s = E_s/t$  составляла при этом  $0,4 \cdot 10^6$ ,  $0,6 \cdot 10^6$  и  $0,27 \cdot 10^6$  Вт/см<sup>2</sup> в режимах 1, 2 и 3 соответственно; количество импульсов воздействия  $N = 3$ ; частота следования импульсов  $f = 0,3$  с<sup>-1</sup>; давление остаточного газа (аргона) в рабочей камере установки составляло примерно 0,02 Па.

Исследования фазового состава и зеренной структуры стали в исходном состоянии, после обработки электронным пучком и после усталостных испытаний осуществляли методами металлографии травленого шлифа (микроскоп OLYMPUS GX71, оснащенный цифровой камерой DP70 с программным обеспечением Image Scope M), сканирующей (микроскоп SEM-515 «Philips») и просвечивающей (микроскоп ЭМ-125) электронной микроскопии.

В исходном состоянии исследуемая сталь является поликристаллическим агрегатом (рис. 1, а), средний размер зерен составляет 41,4 мкм, размеры реальных зерен изменяются в пределах 11,4 – 88,7 мкм (рис. 1, б). Характерным элементом зеренной структуры стали в исходном состоянии являются микродвойники (рис. 1, а). Исследуемая сталь не является однофазным материалом. Вдоль границ зерен в виде протяженных прослоек (рис. 1, в), реже в объеме зерен в виде частиц округлой формы (рис. 1, з) выявляются частицы второй фазы. Поперечные и продольные размеры частиц, расположенных вдоль границ зерен, изменяются в пределах 40 – 100 нм и 0,2 – 1,0 мкм соответственно.

Деформация стали в условиях усталостного нагружения сопровождается изменением состояния зеренного ансамбля материала (состояние зеренного ансамбля исследовали в слое, прилегающем к поверхности разрушения стали) (рис. 2, а, в). Многоцикловое усталостное нагружение до разрушения привело к уменьшению

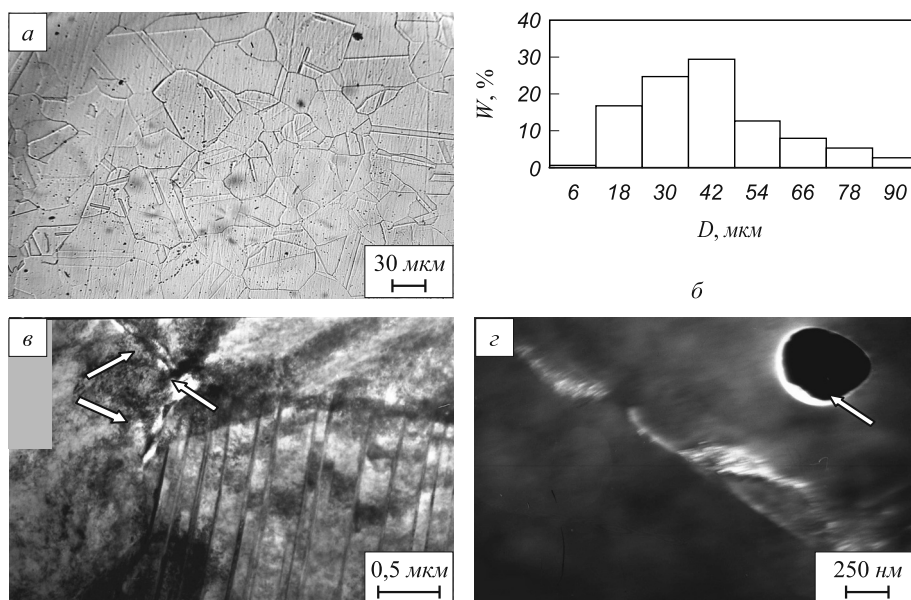


Рис. 1. Полученная путем металлографии травленого шлифа зеренная (а) и полученная методом просвечивающей электронной микроскопии внутриверенная (в, з) структуры поверхностного слоя стали 20Х23Н18 в исходном состоянии, а также распределение зерен по размерам в этом слое (б). На поз. в и з стрелками показаны частицы второй фазы

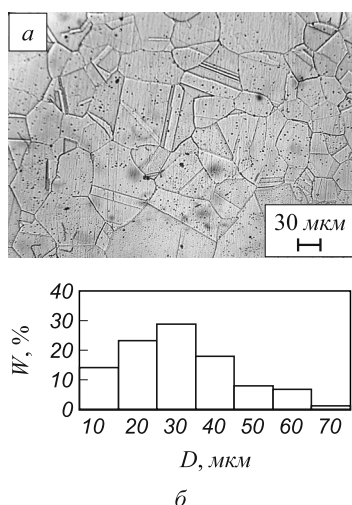


Рис. 2. Изображения зеренной структуры (а, в) и распределение зерен по размерам (б) в поверхностном слое стали 20X23N18 в исходном состоянии в зоне усталостного разрушения. На поз. в стрелками показаны микротрещины

среднего размера зерен примерно в 1,3 раза до 31,3 мкм, размеры реальных зерен стали в разрушенном состоянии изменяются в пределах 8,6 – 71,3 мкм (рис. 2, б). Сопоставляя гистограммы (рис. 1, б и рис. 2, б), можно отметить, что уменьшение среднего размера зерен разрушенного образца обусловлено снижением и минимального, и максимального размеров зерен в разру-

шенном материале по сравнению с размерами зерен в материале в исходном состоянии.

В объеме зерен разрушенной стали (как и зерен стали в исходном состоянии) наблюдаются многочисленные микродвойники. Особенностью структуры разрушенного материала является наличие микротрещин, распространяющихся как вдоль границ, так и по объему зерен (рис. 2, в). Как правило, микротрещины располагаются параллельно поверхности разрушения образца в несколько слоев.

Обработка поверхности облучения по режимам 1, 2 и 3 привела к уменьшению среднего размера зерен до 21,3 мкм (рис. 3), 18,4 и 22,5 мкм (рис. 4) соответственно.

Размеры реальных зерен стали, обработанной по режиму 1, изменяются в пределах 4,6 – 67,0 мкм, следовательно, электронно-пучковая обработка сдвигает спектр размеров зерен стали в сторону малых величин (рис. 1, б и рис. 3, б). Высокоскоростная кристаллизация поверхностного слоя стали приводит к формированию ячеистой структуры (рис. 3, з). Размеры ячеек зависят от их расположения в зерне, а именно, средний размер ячеек, расположенных в объеме зерен и в приграничных областях зерен, составляет 210 и 630 нм соответственно.

В объеме зерен наблюдаются следы скольжения (рис. 3, а), что говорит о формировании в поверхностном слое стали полей напряжений, величина которых превышает предел текучести материала. В отдельных случаях вдоль границ зерен выявляются микротрещины (рис. 3, а). Это также указывает на высокий уровень напряжений, формирующихся в поверхностном слое стали при высокоскоростном охлаждении, реализующемся при электронно-пучковой обработке.

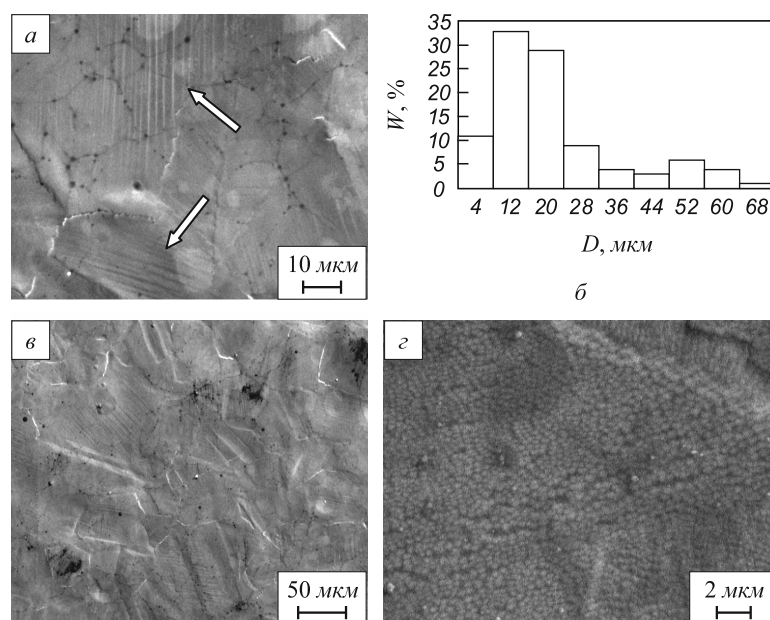


Рис. 3. Изображения зеренной (а, в) и внутризеренной (г) структуры, формирующейся в поверхностном слое стали 20X23N18 при облучении по режиму 1, а также распределение зерен по размерам в этом слое (б). На поз. а стрелками показаны следы скольжения



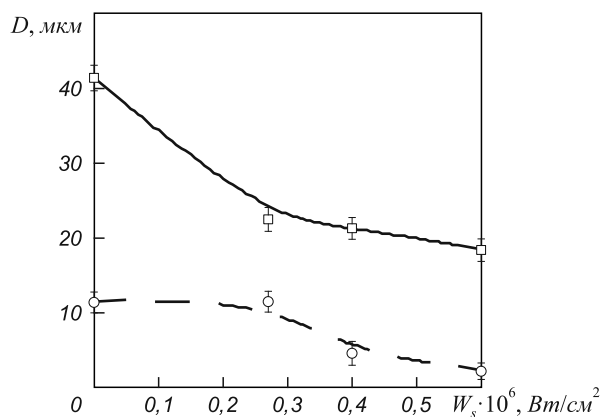


Рис. 4. Зависимость среднего (—) и минимального (---) размеров зерен поверхностного слоя стали 20Х23Н18, обработанной высокоинтенсивным низкоэнергетическим электронным пучком, от плотности мощности пучка электронов

Зеренная структура поверхностного слоя стали, обработанной по режимам 2 и 3, весьма неоднородна, размеры реальных зерен изменяются в пределах 2,2 – 85,8 мкм (режим 2) и 11,5 – 86,0 мкм (режим 3). Зерна, размеры которых составляют единицы микрометров, располагаются группами преимущественно в стыках границ зерен, что может указывать на протекание в стали процесса рекристаллизации, инициированного высоким уровнем напряжений, возникающих в материале при высокоскоростном охлаждении.

Размеры ячеек, сформированных в слое после обработки по режиму 2, зависят от расположения в зерне; в объеме зерен средний размер ячеек составляет 200 нм, в приграничных областях – 600 нм. Размеры ячеек кристаллизации при режиме обработки 3 изменяются в пределах 300 – 400 нм и практически не зависят от расположения относительно границы зерна.

Таким образом, исследования морфологии поверхности облучения, выполненные методами оптической и сканирующей электронной микроскопии, выявили поликристаллическую структуру, средний и минимальный размер зерен снижаются при увеличении плотности мощности пучка электронов.

Анализ зеренной структуры лицевой поверхности разрушенного образца, обработанного электронным пучком по режиму 1, выявил поликристаллическую структуру, средний размер зерен составляет 25,4 мкм и практически совпадает со средним размером зерен стали, облученной перед усталостными испытаниями (рис. 3, б). Размеры реальных зерен изменяются в пределах 5 – 80 мкм, что близко к интервалу изменения размера зерен, сформировавшихся в стали при обработке электронным пучком (рис. 3, б). Последнее может свидетельствовать о малой подвижности границ зерен стали, обработанной электронным пучком в выбранном режиме облучения, что обеспечивается, как отмечалось выше, присутствием на границах частиц карбидной фазы (рис. 3, а).

В объеме зерен выявляется ячеистая субструктура, причиной формирования которой являются высокие скорости охлаждения стали на стадии облучения поверхности образцов электронным пучком. Размеры ячеек (как и в случае, отмеченном выше) зависят от их расположения в зернах, а именно, средний размер ячеек, расположенных в объеме зерен, составляет 250 нм, расположенных в приграничных областях зерен – 750 нм.

Средние размеры зерен усталостно разрушенной стали, предварительно обработанной по режимам 2 и 3, составляют 27,8 и 24,3 мкм соответственно. Размеры реальных зерен изменяются при этом в пределах 3 – 132 мкм (режим 2) и 4 – 133 мкм (режим 3).

Следовательно, усталостные испытания предварительно облученной электронным пучком стали сопровождаются существенным расширением спектра зерен в сторону больших размеров. Это может указывать на протекание в стали процесса собирательной рекристаллизации, инициированной усталостными испытаниями.

Усталостные испытания не привели к разрушению структуры ячеистой кристаллизации. Размеры ячеек при обработке по режимам 2 и 3 меняются в пределах 250 – 400 нм.

При всех режимах обработки в объеме зерен обнаруживаются многочисленные следы скольжения, свидетельствующие о протекании в поверхностном слое стали пластической деформации (рис. 5, в). Напомним, что следы скольжения наблюдались в данных образцах уже после облучения и были инициированы, как отмечалось выше, закалочными напряжениями, величина которых превышает предел текучести материала. Характерным элементом структуры разрушенной стали являются микротрещины, распространяющиеся преимущественно вдоль границ зерен (рис. 5, а, в).

Закономерности изменения зеренной структуры стали, облученной электронным пучком и разрушенной при усталостных испытаниях (рис. 6), свидетельствуют о том, что с увеличением плотности мощности пучка электронов средний размер зерен в зоне разрушения стали увеличивается, в то время как усталостное нагружение стали в исходном состоянии сопровождается уменьшением среднего размера зерен.

**Выводы.** Электронно-пучковая обработка приводит к существенному измельчению зеренной структуры стали. Высказано предположение о протекании в стали процесса динамической рекристаллизации, инициированного высоким уровнем напряжений, возникающих в материале при высокоскоростном охлаждении. Выявлено формирование в объеме зерен ячеек при высокоскоростной кристаллизации стали. Размеры ячеек зависят от расположения в зерне: в объеме зерен средний размер ячеек составляет 200 – 400 нм, в приграничных областях – приблизительно 600 нм. Установлено, что ячейки кристаллизации не разрушаются в условиях многоциклового усталостного нагружения. Усталостные испытания стали 20Х23Н18 сопровождаются процес-

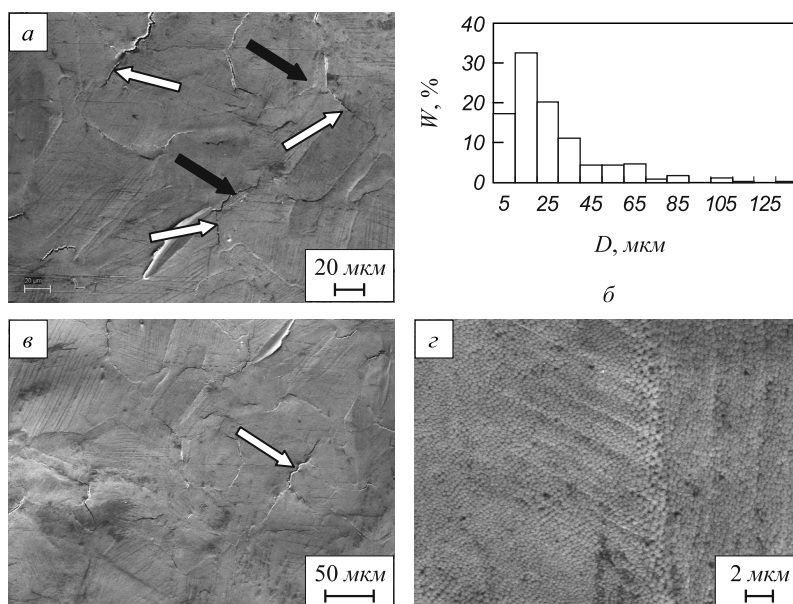


Рис. 5. Изображения зеренной (а, в) и субзеренной (г) структуры, формирующейся в поверхностном слое стали 20Х23Н18 при облучении по режиму 2 и последующем усталостном нагружении, а также распределение зерен по размерам в этом слое (б). На поз. а темными стрелками показаны группы зерен, размеры которых составляют единицы микрометра; на поз. а и в светлыми стрелками показаны микротрещины

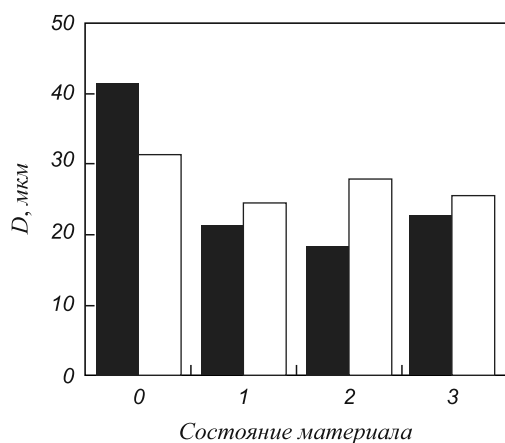


Рис. 6. Диаграмма изменения средних размеров зерен стали 20Х23Н18 в исходном состоянии (0) и после облучения электронным пучком при  $W_s = 0,4 \cdot 10^6$  Вт/см<sup>2</sup> (1),  $W_s = 0,6 \cdot 10^6$  Вт/см<sup>2</sup> (2),  $W_s = 0,27 \cdot 10^6$  Вт/см<sup>2</sup> (3):

■ – исходное состояние (0) и после обработки по режимам 1 – 3;  
□ – после разрушения в результате усталостных испытаний

сом динамической рекристаллизации. Многоцикловые усталостные испытания стали в исходном состоянии приводят к снижению среднего размера зерен в зоне разрушения материала, после предварительной обработки электронным пучком – к его увеличению.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Горелик С.С. Рекристаллизация металлов и сплавов. – М.: Металлургия, 1978. – 568 с.
2. Рекристаллизация металлических материалов / Ред. Ф. Хесснер. – М.: Металлургия, 1982. – 352 с.
3. Иванов Ю.Ф., Громов В.Е., Воробьев С.В. и др. // Физ. мезомеханика. 2011. Т. 14. № 6. С. 111 – 116.
4. Иванов Ю.Ф., Громов В.Е., Горбунов С.В. и др. // ФММ. 2011. Т. 112. № 1. С. 85 – 93.
5. Иванов Ю.Ф., Коваль Н.Н., Горбунов С.В. и др. // Изв. вуз. Физика. 2011. № 5. С. 61 – 69.
6. Иванов Ю.Ф., Горбунов С.В., Воробьев С.В. и др. // Физ. мезомеханика. 2011. Т. 14. № 1. С. 75 – 82.
7. Марочник сталей и сплавов / Под ред. В.Г. Сорокина. – М.: Машиностроение, 1989. – 640 с.
8. Физические основы повышения усталостной долговечности нержавеющей сталей / Ю.Ф. Иванов, С.В. Воробьев, С.В. Коновалов и др. – Новокузнецк: Изд-во «Интер-Кузбасс», 2011. – 302 с.
9. Иванов Ю.Ф., Коваль Н.Н. – В кн.: Структура и свойства перспективных металлических материалов / Под общ. ред. А.И. Потекаева. – Томск: Изд-во НТЛ, 2007. С. 345 – 382.
10. Коваль Н.Н., Иванов Ю.Ф. // Изв. вуз. Физика. 2008. № 5. С. 60 – 70.

© 2012 г. В.В. Сизов, В.Е. Громов,  
Ю.Ф. Иванов, С.В. Воробьев,  
С.В. Коновалов  
Поступила 12 марта 2012 г.