

гие напряжения. На второй стадии изготовления изделия (образец 3.2) фрагментация охватывает весь объем материала. Объемная доля пластинчатого перлита уменьшается, а глобулярного перлита незначительно увеличивается. Внутренние напряжения во всех морфологических составляющих стали уменьшаются по мере изготовления изделия (рис. 3). Средняя по материалу скалярная плотность дислокаций постепенно уменьшается при переходе от одной стадии изготовления изделия к другой. Время задержки поверхностных акустических волн изменялось по мере изготовления изделия от 75 нс после чернового режима (образец 3.1) до 30 нс после чистовой обработки (образец 3.3).

Выводы. Механико-термическое воздействие приводит к изменениям структурно-фазового состояния поверхностных слоев заготовок из стали 35ХГС. Выбран оптимальный режим обработки, при котором на поверхности изделия формируется структурное состояние с минимальным (250 – 300 МПа) уровнем внутренних полей напряжений. Показано наибольшее влияние локальных полей внутренних напряжений, возникающих в стали 35ХГС после механико-термической обработки, на изменение акустических характеристик.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Су слов А.Г. – В кн.: Инженерия поверхности. Приложение к журналу «Справочник. Инженерный журнал». – М.: Машиностроение, 2001. № 4. С. 3 – 9.
2. Смирнов А.Н., Козлов Э.В. Субструктура, внутренние поля напряжений и проблема разрушений паропроводов из стали 12Х1МФ. – Кемерово: Кузбассвуиздат, 2004. – 163 с.

3. Градиентные структуры в перлитной стали / Э.В. Козлов, В.Е. Громов, В.В. Коваленко и др. – Новокузнецк: изд. СибГИУ, 2004. – 224 с.

© 2012 г. А.С. Глинка, А.Н. Смирнов, Э.В. Козлов, Н.А. Конева, С.А. Рябов
Поступила 19 апреля 2011 г.

УДК 669.15

**Д.А. Бессонов¹, С.В. Воробьев¹, В.Е. Громов¹,
Ю.Ф. Иванов², В.Я. Целлермаер¹**

¹ Сибирский государственный индустриальный университет

² Институт сильноточной электроники СО РАН

ЭВОЛЮЦИЯ ЗЕРЕННОЙ СТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ СТАЛИ 20Х13, ПОДВЕРГНУТОЙ ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ ОБРАБОТКЕ¹

Подавляющее большинство промышленных сталей является поликристаллическими материалами, структура которых формируется в материале при различных способах обработки и существенно влияет на его свойства. Важнейшими параметрами зеренной структуры являются средний размер зерна, степень совершенства зерен, характер и степень разнорзернистости

материала, наличие и характер текстуры, степень неравномерности зерен [1, 2]. В области температур, при которых большеугловые границы приобретают способность к перемещению, в поликристаллических материалах протекают рекристаллизационные структурные изменения, которые приводят к замене одних зерен другими, обладающими меньшей энергией [1, 2].

Одним из эффективных методов воздействия на зеренную структуру материалов является обработка интенсивными импульсно-периодическими электронными пучками, преимущество которой состоит в сочетании полного поглощения энергии электронов и объемного характера

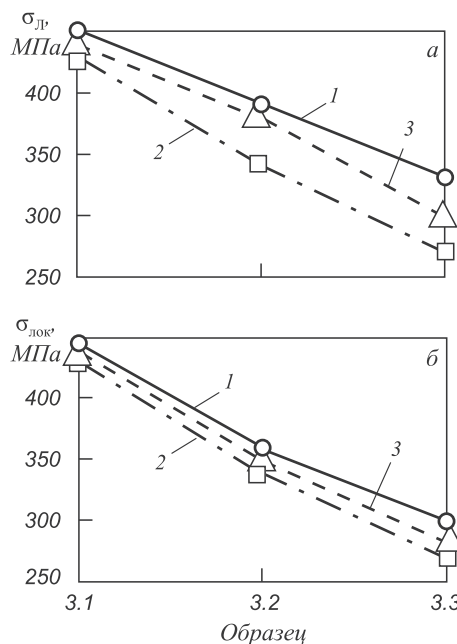


Рис. 3. Изменение амплитуды внутренних напряжений за счет дислокаций «леса» (а) и локальных внутренних напряжений (б) в стали 35ХГС на различных этапах изготовления изделия: 1 – в перлите; 2 – в феррите; 3 – в среднем по материалу

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) и гранта президиума РАН (проект № 27.4).

ее выделения с возможностью весьма широкого варьирования глубины проникновения электронов в материал. Такие пучки являются уникальным и высокоэффективным инструментом как для исследований физической природы формирования структурно-фазовых состояний в твердом теле, так и для целенаправленной модификации структуры и свойств материалов с целью улучшения эксплуатационных характеристик изделий [3 – 5].

Так, электронно-пучковая обработка (ЭПО) с плотностью энергии 15 Дж/см² увеличивает усталостную долговечность стали 08X18H10T в 1,5 раза [6], а с плотностью энергии 10 Дж/см² стали 20X13 – в 1,4 раза [7]. Для выяснения физической природы повышения усталостного ресурса сталей необходимо знание закономерностей формирования структурно-фазовых состояний при ЭПО.

Целью настоящей работы является изучение закономерностей эволюции зеренной структуры поверхностного слоя нержавеющей стали, подвергнутой высокоинтенсивной обработке электронным пучком.

В качестве материала исследования использовали сталь марки 20X13 [8]. Термическая обработка стали состояла в отжиге при температуре 980 °С в течение 3 ч и последующей закалке в воде. Электронно-пучковую обработку осуществляли на установке «СОЛЮ» [9]. Параметры облучения: длительность τ импульса воздействия пучка электронов 50 мкс; количество и частота следования импульсов облучения $N = 3$ имп. и $f = 0,3$ Гц; плотность энергии пучка электронов (E_s)

составляла 10, 15, 20, 25, 30 Дж/см², среда облучения – инертный газ аргон при остаточном давлении приблизительно 0,02 Па. Облучаемые образцы имели форму пластинок толщиной 5 мм размерами 8×14 мм. Исследования поверхности электронно-пучковой обработки стали осуществляли методами металлографии травленного 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 – поликристаллический агрегат, в объеме зерен которого в результате закалки сформирована мартенситная структура. Зерна имели неравноосную форму, что вызвано предварительной термомеханической обработкой стали. Средние продольные (L) и поперечные (D) размеры зерен составляли 19,8 мкм ($\sigma = \pm 8,0$ мкм) и 12,4 мкм ($\sigma = \pm 5,0$ мкм) соответственно. По границам зерен наблюдаются частицы второй фазы, которые являются, предположительно, карбидами железа и хрома.

После обработки стали при плотности энергии пучка электронов 10 Дж/см² (соответствует режиму начального плавления [10], частично исчезают дефекты (царапины), внесенные при полировке) на поверхности стали формируется слой, характеризующийся ультрамалым размером зерен: средние продольные и поперечные размеры составляют 3,6 мкм ($\sigma = \pm 1,4$ мкм) и 2,2 мкм ($\sigma = \pm 0,93$ мкм) соответственно (рис. 1, а, б).

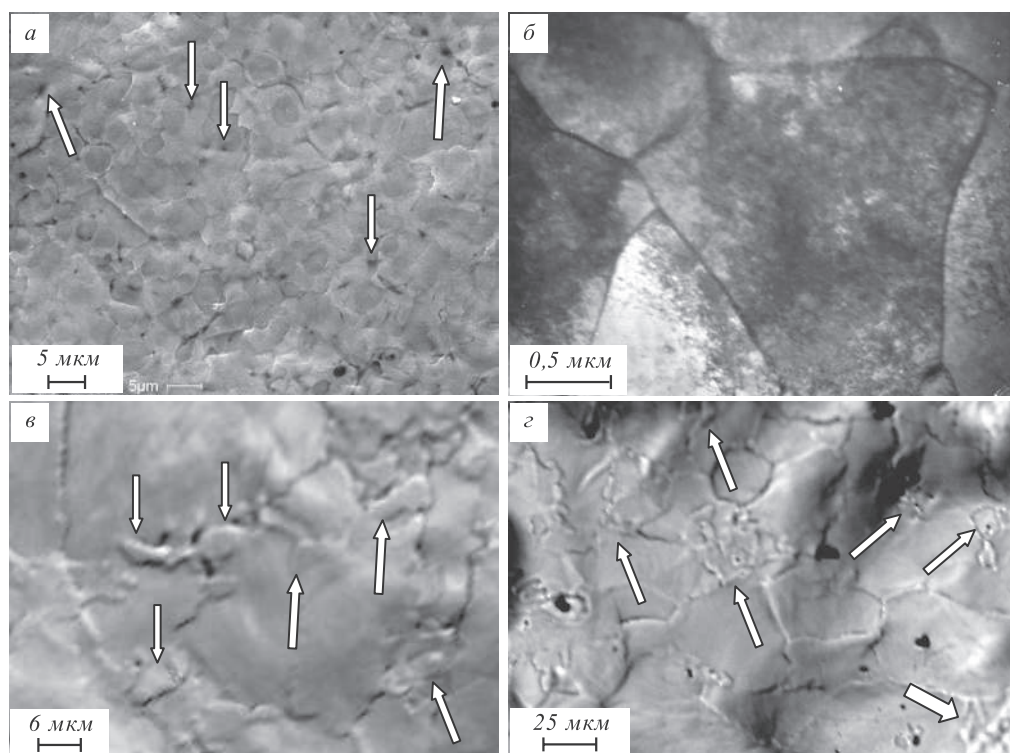


Рис. 1. Структура поверхности стали 20X13, обработанной высокоинтенсивным электронным пучком при плотности энергии пучка электронов 10 Дж/см² (а, б), 15 Дж/см² (в) и 25 Дж/см² (г) (изображения получены методами сканирующей (а), просвечивающей (б) электронной и оптической (в, г) микроскопии)

Особенностью формирующейся структуры является присутствие по границам зерен большого количества частиц второй фазы (на рис. 1, *а* частицы указаны стрелками).

Электронно-пучковая обработка поверхности стали при плотности энергии пучка электронов более 15 Дж/см² соответствует режиму плавления поверхностного слоя. В результате высокоскоростной кристаллизации и последующего охлаждения в поверхностном слое стали формируется зеренная структура двух масштабных уровней: зерна, размеры которых изменяются в пре-

делах 15 – 150 мкм; зерна, размеры которых изменяются в пределах десятых долей – единиц микрометра (рис. 1, *в, з*). Зерна второго масштабного уровня при обработке стали электронным пучком с плотностью энергии 15 – 25 Дж/см² располагаются по границам и в стыках границ крупных зерен. С увеличением плотности энергии пучка электронов объемная доля поверхностного слоя стали, занятая зернами второго масштабного уровня, увеличивается и при $E_s \geq 30$ Дж/см² достигает 95 – 100 %. Гистограммы распределения продольных и поперечных размеров зерен представлены на рис. 2.

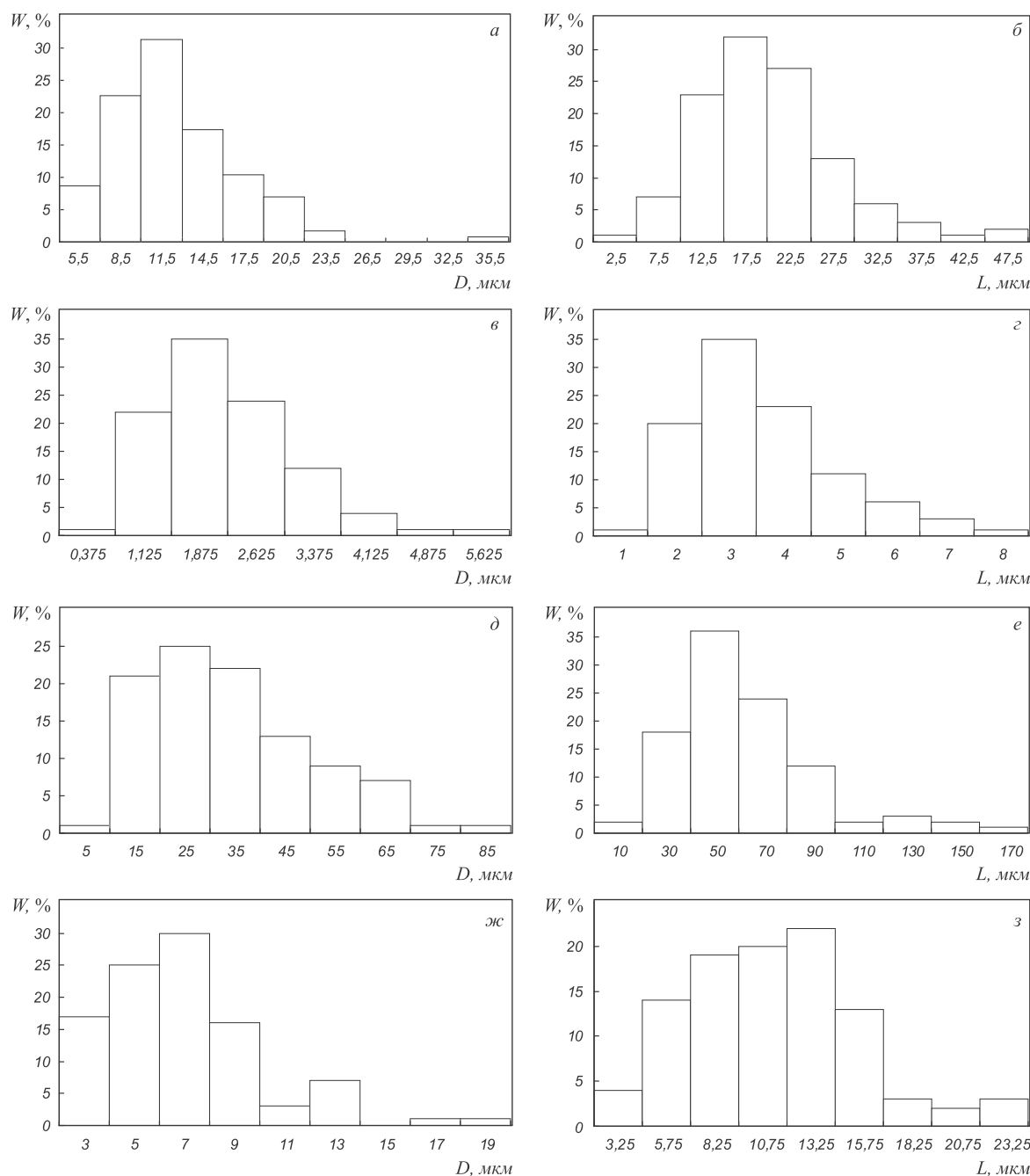


Рис. 2. Распределение поперечных и продольных размеров зерен стали 20X13 до облучения (*а, б*) и зерен, формирующихся в поверхностном слое образцов, обработанных высокоинтенсивным электронным пучком субмиллисекундной длительности воздействия с плотностью энергии пучка электронов 10 Дж/см² (*в, г*) и 25 Дж/см² (*д, е*) (зерна первого масштабного уровня), 25 Дж/см² (*ж, з*) (зерна второго масштабного уровня)

Изменение средних размеров зерен, учитывающее зерна обоих масштабных уровней, приведено на рис. 3, изменение средних размеров зерен второго масштабного уровня – на рис. 4.

Отчетливо видно, что средние размеры зерен существенным образом зависят от плотности энергии пучка электронов: структура с максимальным средним значением размеров зерен формируется в поверхностном слое стали, облученной электронным пучком с плотностью энергии пучка электронов 25 Дж/см². Мелкозеренная структура поверхностного слоя стали формируется при двух режимах электронно-пучковой обработки: при обработке электронным пучком в предплавленном режиме ($E_s = 10$ Дж/см²) и в режиме плавления поверхностного слоя, соответствующем толщине расплавленного слоя приблизительно 10 мкм. Следует отметить, что продольные и поперечные размеры зерен обоих масштабных уровней изменяются с увеличением плотности энергии пучка электронов коррелированным образом (рис. 3, б; рис. 4, б).

При анализе полученных в настоящей работе результатов необходимо учитывать, что в сталях фер-

ритного класса рекристаллизация сопровождается полиморфными превращениями. В этом случае процесс разбивается условно на две стадии: 1 – зарождение и рост кристаллитов (зерен) новой фазы до их столкновения; 2 – рост одних зерен (кристаллитов) новой фазы путем поглощения других зерен этой же фазы (так называемая стадия собирательной рекристаллизации [1]). Первая стадия представляет собой фазовую перекристаллизацию, вторая – структурную рекристаллизацию.

В случаях, когда полиморфное превращение сопровождается значительным объемным эффектом вследствие разницы в удельных объемах старой и новой фаз (в стали такая ситуация реализуется при исходной мартенситной структуре), исходная и вновь образующаяся фазы испытывают фазовый наклеп. Такой наклеп часто приводит к тому, что после завершения фазовой перекристаллизации в материале протекает первичная рекристаллизация, которая, по своей сути, является динамической рекристаллизацией (т.е. процессом преобразования зеренной структуры материала, при котором деформация и термическое воздействие совмещены

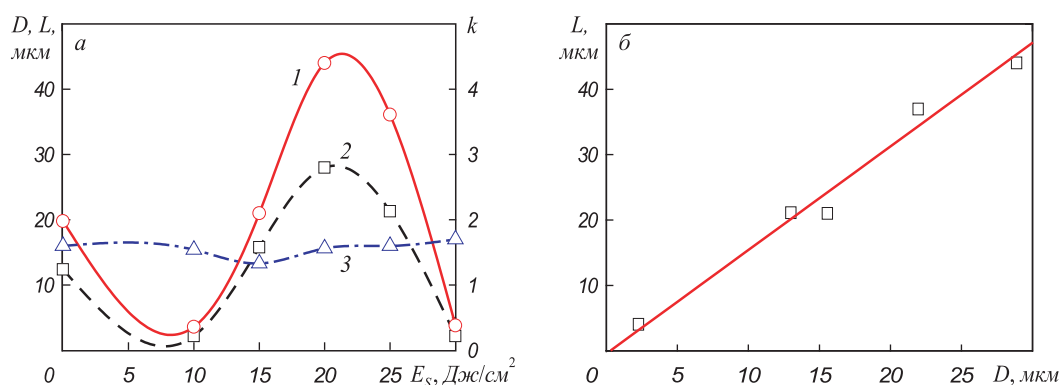


Рис. 3. Зависимости (а) средних продольных (—), поперечных (---) размеров зерен и коэффициента k неравноосности (· · ·) зерен от плотности энергии пучка электронов и линейная корреляция (б), связывающая средние продольные и поперечные размеры зерен

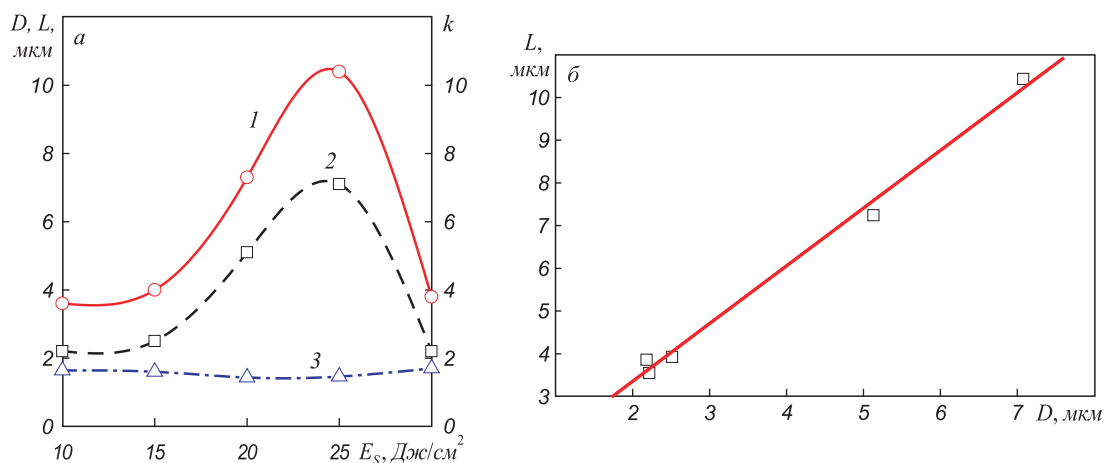


Рис. 4. Зависимости (а) средних продольных (—), поперечных (---) размеров зерен второго масштабного уровня и коэффициента k неравноосности (· · ·) зерен от плотности энергии пучка электронов и линейная корреляция (б), связывающая средние продольные и поперечные размеры зерен

во времени). Схематически этот процесс представлен (соответственно работе [11]) на рис. 5. Согласно схеме зеренная структура, формирующаяся в поверхностном слое стали в результате электронно-пучковой обработки при плотности энергии пучка электронов приблизительно 10 Дж/см^2 , является продуктом высокоскоростной динамической рекристаллизации.

При обработке стали электронным пучком с плотностью энергии пучка электронов более 15 Дж/см^2 наблюдается плавление поверхностного слоя, зеренная структура поверхностного слоя формируется в результате кристаллизации и последующего высокоскоростного охлаждения стали. При малой толщине расплавленного слоя (при $E_s = 15 \div 25 \text{ Дж/см}^2$) формируется структура, наследующая зеренную структуру исходного состояния стали. Вновь сформировать ультрамелкозернистую структуру в поверхностном слое стали удастся при толщине расплавленного слоя $8 - 10 \text{ мкм}$ (при $E_s \approx 30 \text{ Дж/см}^2$).

Выводы. Осуществлена высокоинтенсивная импульсная электронно-пучковая обработка поверхности предварительно закаленной стали 20Х13. Выполнены исследования зеренной структуры, формирующейся в поверхностном слое стали. Выявлены режимы электронно-пучковой обработки, позволяющие формировать в поверхностном слое стали структуру с малым размером зерен.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Горелик С.С. Рекристаллизация металлов и сплавов. – М.: Металлургия, 1978. – 568 с.
2. Рекристаллизация металлических материалов / Под ред. Ф. Хесснера. – М.: Металлургия, 1982. – 352 с.
3. Горбунов С.В., Иванов Ю.Ф., Воробьев С.В. и др. // Изв. вуз. Черная металлургия. 2011. № 2. С. 33 – 35.
4. Громов В.Е., Горбунов С.В., Иванов Ю.Ф. и др. // Поверхность. 2011. № 10. С. 41 – 44.
5. Коваль Н.Н., Иванов Ю.Ф. // Изв. вуз. Физика. 2008. № 5. С. 60 – 70.
6. Иванов Ю.Ф., Горбунов С.В., Воробьев С.В. и др. // Физическая мезомеханика. 2011. Т. 14. № 1. С. 75 – 83.
7. Бессонов Д.А., Воробьев С.В., Коновалов С.В. // Изв. вуз. Черная металлургия. 2011. № 10. С. 48, 49.
8. Марочник сталей и сплавов / Под ред. В.Г. Сорокина. – М.: Машиностроение, 1989. – 640 с.

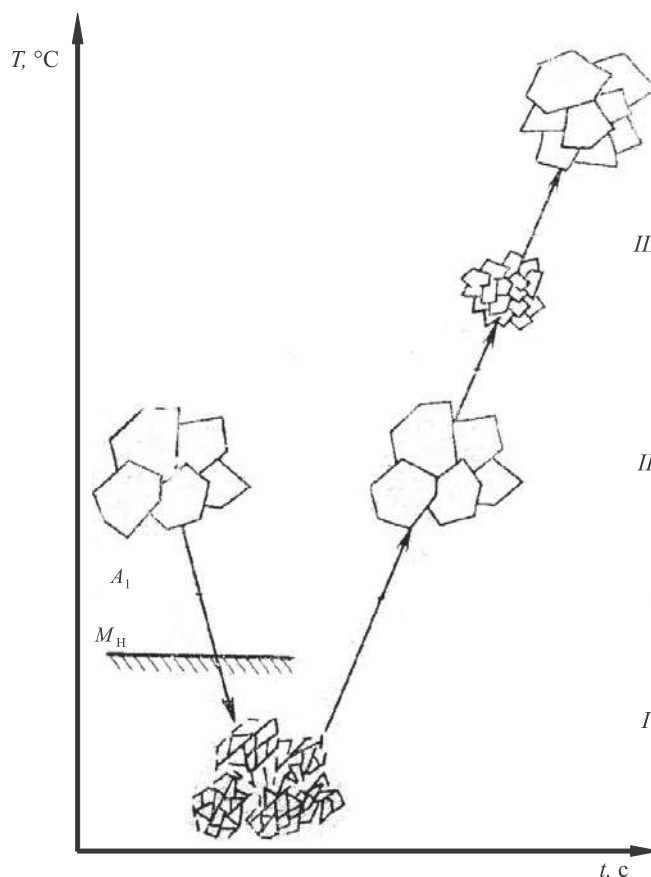


Рис. 5. Последовательность протекания процесса образования аустенита в условиях фазового наклепа [11]:

I – мартенситная область; *II* и *III* – аустенитные области (*II* – область фазовой перекристаллизации; *III* – область первичной рекристаллизации в условиях фазового наклепа)

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. Rotshtein V., Ivanov Yu., Markov A. Materials surface processing by directed energy techniques. Ed. by Y. Pauleau: Elsevier, 2006. P. 205 – 240.
11. Гуляев А.П. Металловедение. – М.: Металлургия, 1978. – 647 с.

© 2012 г. Д.А. Бессонов, С.В. Воробьев, В.Е. Громов,
Ю.Ф. Иванов, В.Я. Целлермаер
Поступила 27 апреля 2011 г.