

# Структурно-фазовый градиент, формирующийся в рельсовой стали, подвергнутой обработке высокointенсивным электронным пучком

В. А. Гришунин, Ю. Ф. Иванов, В. Е. Громов,  
А. Д. Тересов, С. В. Коновалов

---

Методами сканирующей и просвечивающей электронной дифракционной микроскопии установлены закономерности изменения структурно-фазовых состояний и дефектной субструктурой отожженной рельсовой стали, подвергнутой электронно-пучковой обработке с плотностью энергии  $10 \text{ Дж/см}^2$  в зависимости от расстояния до поверхности облучения.

**Ключевые слова:** градиент, структурно-фазовые состояния, рельсовая сталь, поверхность, электронно-пучковая обработка.

---

Regularities of structure phase states and defect substructure modification at annealed rail steel subjected to the electron beam treatment with the  $10 \text{ J/cm}^2$  density energy in dependence on the distance from irradiation surface are established by methods of scanning and transmission electron diffraction microscopy.

**Key words:** gradient structure phase state, rail steel, surface, electron beam treatment.

---

## Введение

Перевод в субмикро- и нанокристаллическое состояние является одним из наиболее универсальных и высокоэффективных способов качественного изменения физико-механических свойств металлов и сплавов [1, 2]. Одним из методов формированияnano- и субмикрокристаллического состояния в приповерхностных слоях материала (без существенного изменения свойств объема в целом) является обработка его концентрированными потоками энергии (КПЭ). Характерной особенностью воздействия КПЭ являются сверхвысокие (до  $10^{10} \text{ К/с}$ ) скорости нагрева и весьма малые (до  $10^{-6} \text{ с}$ ) времена воздействия высоких температур, что способствовало их применению в области модификации металлических материалов, в том числе и сталей широкого назначения, и вывело в разряд быстроразвивающихся направлений современного материаловедения [3]. Одним из перспективных способов обработки поверхности металлов и сплавов, металлокерамических и керамических материалов является метод,

основанный на использовании высокointенсивных низкоэнергетических импульсных электронных пучков [4]. Это, в первую очередь, связано с уникальными свойствами электронного пучка как инструмента обработки: высокий коэффициент преобразования энергии (более  $\sim 90\%$ ); низкий (менее  $\sim 10\%$ ) коэффициент отражения энергии пучка от подложки; значительные (до  $10 \text{ см}^2$ ) размеры отпечатка электронного пучка на обрабатываемой поверхности; высокая плотность мощности электронного пучка (более  $10^6 \text{ Вт/см}^2$ ); высокая частота следования импульсов тока пучка (более  $10 \text{ Гц}$ ) [5].

Принципиально важной особенностью модификации поверхностного слоя низкоэнергетическими высокointенсивными электронными пучками является формирование градиентной структуры и отсутствие выраженной поверхности раздела между модифицированным слоем и объемом материала — модифицированный слой плавно переходит в структуру основного материала [2, 6]. Последнее определяет хорошие демпфирующие свойства материала в целом при механических и температурных

внешних воздействиях, предотвращая преждевременное зарождение и распространение с поверхности в основной объем материала хрупких микротрещин, приводящих к образованию магистральных трещин и разрушению.

Цель настоящей работы — исследование структурно-фазового градиента, формирующегося в углеродистой стали при облучении высокointенсивным электронным пучком.

#### Материал и методика исследования

В качестве материала исследования была использована рельсовая сталь Э76Ф элементного состава, масс. %: 0,76 С; 0,1 V; 0,4 Si; 0,95 Mn; до 0,025 S; до 0,025 P; до 0,02 Al; остальное Fe. Перед облучением электронным пучком сталь прошла следующую термическую обработку: нагрев до 900°C, выдержка 2 ч и охлаждение с печью. Как и в [6], образцы для усталостных испытаний имели форму параллелепипеда размерами  $8 \times 15 \times 145$  мм<sup>3</sup>. Параметры облучения электронным пучком: плотность энергии  $E_S = 10$  Дж/см<sup>2</sup>; длительность импульса воздействия пучка электронов  $\tau = 50$  мкс; количество импульсов

воздействия  $N = 3$  имп.; частота следования импульсов  $f = 0,3$  с<sup>-1</sup>; давление остаточного газа (аргон) в рабочей камере  $\sim 0,02$  Па. Глубина оплавления поверхности слоя при этих параметрах не превышала  $\sim 1$  мкм. Морфологию поверхности облучения изучали методами сканирующей электронной микроскопии [7]. Градиент фазового состава и дефектной субструктурой облученной электронным пучком стали анализировали методами просвечивающей электронной дифракционной микроскопии [8, 9]. Фольги для электронной микроскопии готовили методами одностороннего электролитического утонения пластинок, вырезанных электроискровым методом параллельно поверхности облучения. Анализировали слои, расположенные на расстоянии 10 и 100 мкм от поверхности облучения, а также слой, включающий поверхность облучения.

#### Результаты исследования и их обсуждение

Предварительная термическая обработка стали привела к формированию поликристаллической структуры, представленной зернами структурно свободного феррита, зернами перлита пластинчатой

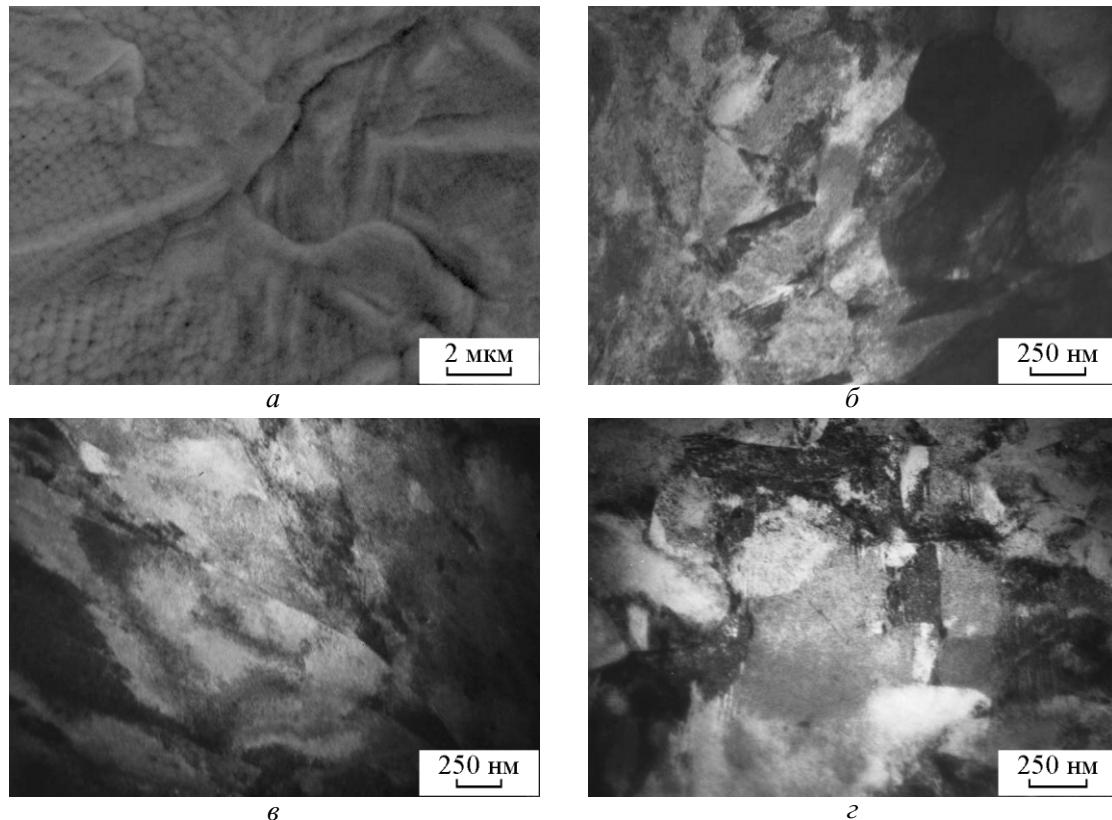


Рис. 1. Электронно-микроскопическое изображение структуры стали, обработанной высокointенсивным электронным пучком (10 Дж/см<sup>2</sup>, 50 мкс, 3 имп., 0,3 с<sup>-1</sup>); *а* — поверхность облучения (сканирующая электронная микроскопия); *б* — *г* — поверхностный слой (просвечивающая электронная микроскопия).

морфологии и, в небольшом количестве, зернами “псевдоперлита” (зернами феррита, содержащими включения цементита пластинчатой и глобулярной формы, расположенные хаотически в объеме зерна). Зерна феррита и “псевдоперлита” содержат дислокационную субструктуру в виде сеток и хаотически расположенных дислокаций со скалярной плотностью дислокаций  $\sim 4 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ . Вблизи границ и стыков границ зерен наблюдается фрагментированная, реже, субзеренная структура. В ферритных прослойках перлита выявляется дислокационная субструктура преимущественно в виде хаотически распределенных дислокаций, скалярная плотность которых  $\sim 2,8 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ . На темнопольных изображениях пластин цементита выявляется крапчатый контраст, что свидетельствует о дефектности цементита.

Облучение стали высокointенсивным электронным пучком, увеличивающее число циклов до разрушения в 1,6 раза, формирует в поверхностном слое поликристаллическую структуру, средний размер зерен которой  $\sim 5 \text{ мкм}$ . В объеме зерен наблюдается субзеренная структура в виде ячеек,

размер которых изменяется в пределах от 0,25 до 0,55 мкм (рис. 1a). Формирование такой структуры (структурой ячеистой кристаллизации) однозначно свидетельствует о плавлении поверхностного слоя и последующей кристаллизации со скоростями не менее  $\sim 10^6 \text{ К/с}$  [2, 4]. Следует отметить, что при облучении стали электронным пучком с  $E_S = 10 \text{ Дж/см}^2$  структура ячеистой кристаллизации наблюдается не во всех зернах (рис. 1a). Это, очевидно, связано с особенностями структуры исходного состояния, а именно, присутствием зерен, обогащенных углеродом (зерна перлита), и зерен с минимальным содержанием углерода (зерна феррита). Сверхвысокие скорости термической обработки, реализующиеся при облучении стали электронным пучком, не приводят к гомогенизации поверхностного слоя, вследствие этого области стали, обогащенные углеродом, кристаллизуются с образованием ячеистой структуры; в областях поверхностного слоя, обедненных углеродом, ячейки кристаллизации не образуются.

На рис. 1б приведено электронно-микроскопическое изображение структуры поверхностного слоя

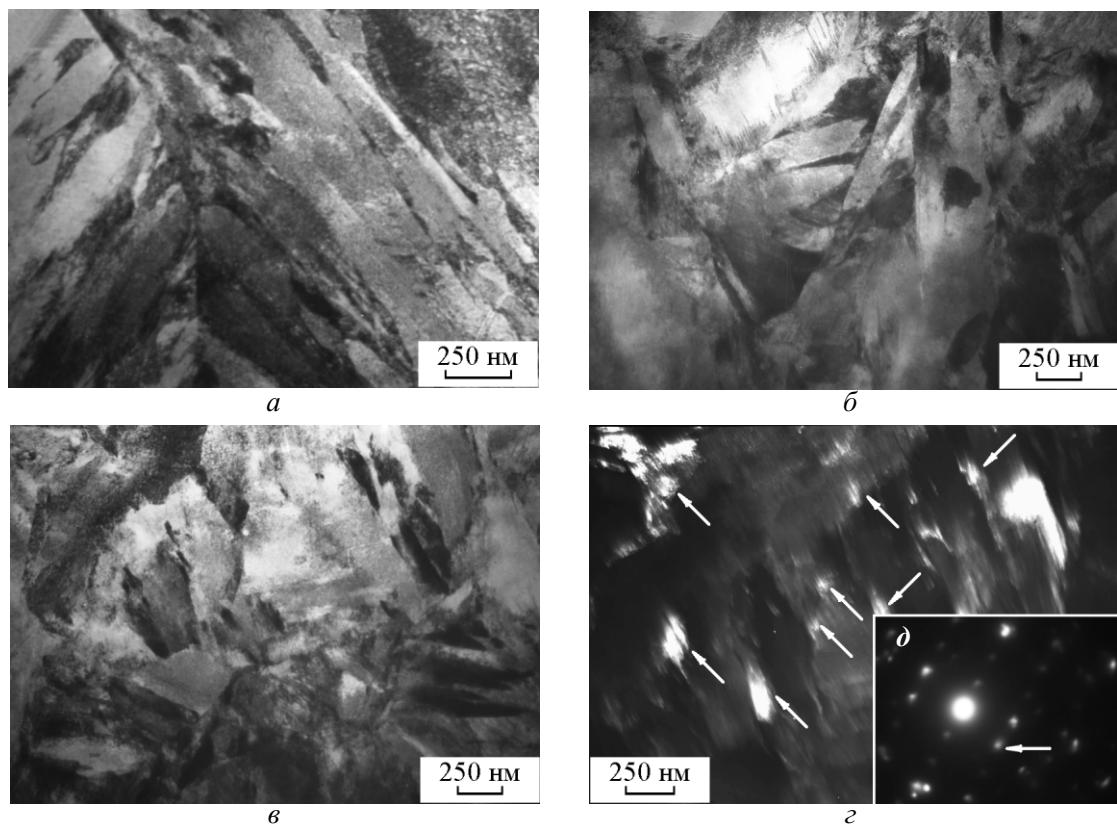


Рис. 2. Электронно-микроскопическое изображение структуры слоя, расположенного на глубине  $\sim 10 \text{ мкм}$  в стали, обработанной высокointенсивным электронным пучком; *а* – *в* – светлые поля; *г* – темное поле, полученное в рефлексе  $[031]\text{Fe}_3\text{C}$ ; *д* – микроэлектронограмма (стрелкой указан рефлекс, в котором получено темное поле). На (*г*) стрелками указаны частицы цементита.

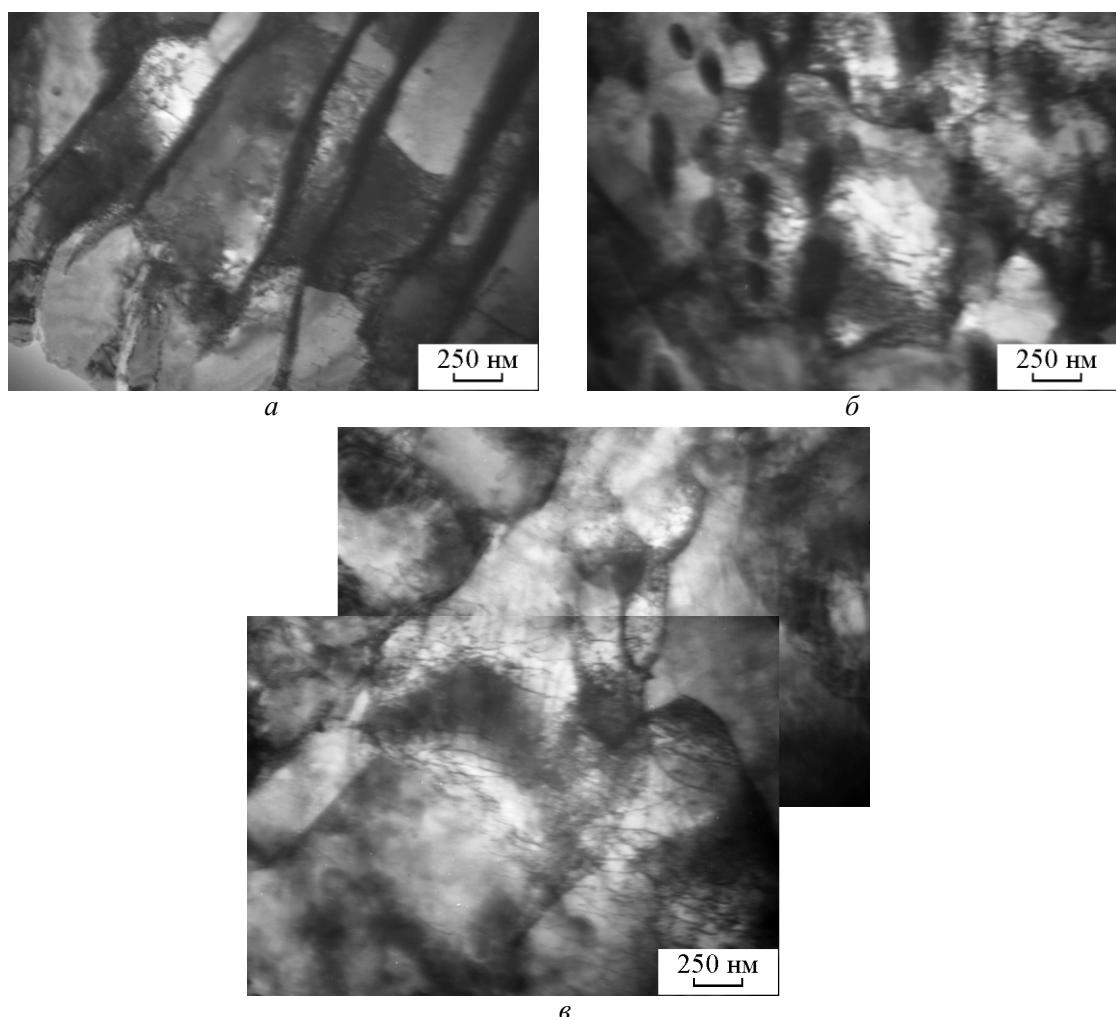


Рис. 3. Электронно-микроскопическое изображение структуры слоя, расположенного на глубине  $\sim 100$  мкм в стали, обработанной высокointенсивным электронным пучком ( $10$  Дж/см $^2$ ,  $50$  мкс,  $3$  имп.,  $0,3$  с $^{-1}$ ).

стали, обработанной электронным пучком, демонстрирующее зернико-субзеренную структуру (далее по тексту, ячейки кристаллизации) с размерами, изменяющимися в пределах от  $300$  до  $600$  нм, что близко к размерам ячеек кристаллизации, выявленных методами сканирующей микроскопии (рис. 1 $a$ ). В объеме ячеек кристаллизации наблюдается пластинчатая структура кристаллов мартенсита (рис. 1 $b$ ) с поперечными размерами в пределах наноразмерного диапазона  $50$  –  $70$  нм.

Наряду со структурой ячеистой кристаллизации, содержащей наноразмерные кристаллы мартенсита, в поверхностном слое выявляется зерна со структурой пакетного мартенсита (поперечные размеры кристаллитов изменяются в пределах от  $85$  до  $220$  нм) и пластинчатого мартенсита (поперечные размеры кристаллитов — в пределах от  $250$  нм до  $1,5$  мкм) (рис. 1 $c$ ) что близко к поперечным размерам крис-

таллов мартенсита стали, закаленной с печного нагрева [10]. Вдоль границ кристаллов мартенсита выявляются прослойки остаточного аустенита, однако объемная доля их мала ( $1$  –  $2\%$ ). Одновременно с мартенситной структурой в объеме зерен присутствуют области микронных размеров, примыкающие к границе зерна, либо окруженные кристаллами мартенсита (рис. 1 $c$ ). В объеме таких областей выявляется сетчатая дислокационная субструктура со скалярной плотностью дислокаций  $\sim 10^{11}$  см $^{-2}$ , что соответствует плотности дислокаций кристаллов мартенсита закаленной стали [11].

Структурно-фазовое состояние стали, формирующееся в зоне термического влияния, анализировали, изучая фольги, расположенные на глубине  $\sim 10$  мкм. Выявлена многофазная структура, представленная мартенситом пакетной и пластинчатой морфологии (рис. 2 $a$ ,  $b$ ), остаточным аустенитом и

цементитом (рис. 2 $\varepsilon$  –  $\delta$ ). Присутствие мартенсита и остаточного аустенита указывает на протекание в данном слое стали полиморфного  $\alpha \rightarrow \gamma \rightarrow \alpha$ -превращения. Наличие частиц цементита может свидетельствовать как о протекании процесса “самоотпуска” мартенсита, так и указывать на неполное растворение цементита перлитных колоний, присутствующих в стали перед облучением. Как правило, “самоотпуск” стали сопровождается формированием частиц цементита игольчатой морфологии, расположенных в кристаллах мартенсита [12]. В исследуемом нами состоянии частицы цементита имеют глобулярную морфологию и располагаются в объеме и по границам кристаллов мартенсита (рис. 2 $\varepsilon$  –  $\delta$ ). Это обстоятельство позволяет предположить, что наблюдающиеся частицы цементита являются осколками частично растворившихся пластин цементита исходного состояния. Следовательно, реализующиеся при электронно-пучковой обработке температурные и временные условия нагрева и охлаждения стали не позволяют сформировать однофазный твердый раствор углерода в аустените.

На глубине  $\sim 100$  мкм наблюдается структура, подобная структуре исходного состояния — фиксируются зерна перлита пластинчатой морфологии (рис. 3 $a$ ), зерна феррита, содержащие частицы цементита глобулярной морфологии, расположенные хаотически в объеме зерна, а также вдоль границ зерен (рис. 3 $b$ ), и зерна структурно свободного феррита (рис. 3 $\varepsilon$ ).

Зерна феррита и ферритные прослойки зерен перлита содержат дислокационную субструктуру в виде сеток, либо в виде хаотически распределенных дислокаций. Большинство зерен феррита, а также прослойки феррита в колониях перлита фрагментированы, то есть разбиты на слаборазориентированные области (рис. 3 $\varepsilon$ ). Очевидно, что данная структура сформировалась в результате предварительной термомеханической обработки стали и не является продуктом воздействия высокоинтенсивного импульсного электронного пучка.

## Заключение

Обработка рельсовой стали высокоинтенсивным импульсным электронным пучком в режиме оплавления поверхностного слоя приводит к формированию градиентного состояния, структура и фазовый состав которого закономерным образом изменяются в зависимости от расстояния до поверхности облучения. Высоконеоднородное состояние структуры поверхности стали (слоя толщиной  $\sim 0,5$  – 1 мкм) представлено зернами  $\alpha$ -фазы с

ячейками кристаллизации, в объеме которых в условиях высокоскоростной закалки формируются кристаллы мартенсита наноразмерного диапазона, и зернами  $\alpha$ -фазы со структурой пакетного и пластинчатого мартенсита, поперечные размеры которых близки к поперечным размерам кристаллов мартенсита стали, закаленной с печного нагрева. Высказано предположение, что формирование неоднородной структуры поверхностного слоя связано со сверхвысокими скоростями нагрева и охлаждения (малым временем гомогенизации), реализующимися при электронно-пучковой обработке. В слое, расположенному на глубине  $\sim 10$  мкм (зона термического влияния), формируется многофазная структура, представленная мартенситом пакетной и пластинчатой морфологии, остаточным аустенитом и цементитом преимущественно глобулярной морфологии. На глубине  $\sim 100$  мкм выявлена структура, подобная структуре исходного состояния.

*Работа выполнена при частичной финансовой поддержке ФЦП “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009 – 2013 гг.” (Соглашение №14.В37.21.0071).*

## Литература

1. Глазер А.М., Громов В.Е. Наноматериалы, созданные путем экстремальных воздействий. Новокузнецк: Изд-во “Интер-Кузбасс”, 2010, 171 с.
2. Глазер А.М., Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Шаркев Ю.П. Наноматериалы: структура, свойства, применение. Новокузнецк: Изд-во “Интер-Кузбасс”, 2012, 423 с.
3. Кадыржанов К.К., Комаров Ф.Ф., Погребняк А.Д. и др. Ионно-лучевая и ионно-плазменная модификация материалов. М.: Изд-во МГУ, 2005, 640 с.
4. Rotshtein V., Ivanov Yu., Markov A. Surface treatment of materials with low-energy, high-current electron beams. Materials surface processing by directed energy techniques. Ed. by Y. Pauleau, Elsevier, 2006, p. 205 – 240.
5. Коваль Н.Н., Иванов Ю.Ф. Наноструктурирование поверхности металлокерамических и керамических материалов при импульсной электронно-пучковой обработке. Известия вузов. Физика, 2008, № 5, с. 60 – 70.
6. Иванов Ю.Ф., Воробьев С.В., Коновалов С.В., Громов В.Е. и др. Физические основы повышения усталостной долговечности нержавеющих сталей. Новокузнецк: Изд-во “Интер-Кузбасс”, 2011, 302 с.
7. Энгеле Л., Клингеле Г. Растворная электронная микроскопия. Разрушение. М.: Металлургия, 1986, 232 с.
8. Утевский Л.М. Дифракционная электронная микроскопия в металловедении. М.: Металлургия, 1973, 584 с.
9. Эндрюс К., Дайсон Д., Кноун С. Электронограммы и их интерпретация. М.: Мир, 197, 256 с.

10. Иванов Ю.Ф. Влияние технологических параметров на размерную однородность пакетного мартенсита. ФММ, 1992, № 9, с. 57 – 63.
12. Иванов Ю.Ф., Козлов Э.В. Морфология цементита в мартенситной фазе стали 38ХН3МФА. ФММ, 1991, № 10, с. 203 – 204.
11. Курдюмов В.Г., Утевский Л.М., Энтин Р.И. Превращения в железе и стали. М.: Наука, 1977, 236 с.

*Статья поступила в редакцию 18.06.2012 г.*

**Громов Виктор Евгеньевич** — Сибирский государственный индустриальный университет (г. Новокузнецк), доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой. Специалист в области физики прочности и пластичности материалов в условиях внешних энергетических воздействий. E-mail: gromov@physics.sibsiu.ru.

**Иванов Юрий Федорович** — Институт сильноточной электроники СО РАН (г. Томск), доктор физико-математических наук, профессор. Специалист в области физического материаловедения E-mail: yufi@mail2000.ru.

**Гришунин Владимир Анатольевич** — Сибирский государственный индустриальный университет (г. Новокузнецк), инженер-исследователь. Специалист в области физического материаловедения E-mail: gromov@physics.sibsiu.ru

**Тересов Антон Дмитриевич** — Институт сильноточной электроники СО РАН (г. Томск), ведущий инженер. Специалист в области физического материаловедения.

**Коновалов Сергей Валерьевич** — Сибирский государственный индустриальный университет (г. Новокузнецк), кандидат технических наук, доцент. Специалист в области физики прочности и пластичности материалов в условиях внешних энергетических воздействий. E-mail: gromov@physics.sibsiu.ru.