

УДК 539.2

ФОРМИРОВАНИЕ НАНОСЛОЕВ ЗА СЧЕТ РАЗВИТИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ НЕУСТОЙЧИВОСТЕЙ ПРИ ВНЕШНИХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ*

Сарычев В.Д.¹, к.т.н., доцент кафедры физики им. В.М. Финкеля (sarychev_vd@mail.ru)

Громов В.Е.¹, д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой физики
им. В.М. Финкеля (gromov@physics.sibsiu.ru)

Невский С.А.¹, к.т.н., доцент кафедры физики им. В.М. Финкеля (nevskiy_sa@physics.sibsiu.ru)

Низовский А.И.², к.х.н., старший научный сотрудник (alexni@inbox.ru)

Коновалов С.В.¹, д.т.н., доцент, профессор кафедры физики
им. В.М. Финкеля (konovalov@physics.sibsiu.ru)

¹ Сибирский государственный индустриальный университет
(654007, Россия, Кемеровская обл., Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

² Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН
(630090, Россия, Новосибирск, ул. Лаврентьева, 5)

Аннотация. С единых позиций интерпретируются экспериментально установленные закономерности формирования упрочняющих поверхностных наноструктур при различных внешних энергетических воздействиях (электровзрывном легировании, электронно-пучковой обработке, термомеханическом упрочнении проката по режиму ускоренного охлаждения, интенсивных механических воздействиях при длительной эксплуатации рельсов). Выполнено математическое моделирование формирования наноструктурных образований в результате развития неустойчивостей равновесных состояний в поверхностных слоях (неустойчивости Кельвина–Гельмгольца и Марангони), проанализированы соответствующие дисперсионные уравнения и получены аналитические зависимости декремента (α) от длины волны (λ) в микро- и нанодиапазонах. Отмечено соответствие числовых значений наблюдаемых максимумов зависимости $\alpha(\lambda)$ экспериментальным значениям параметров наноструктур и дана его физическая интерпретация.

Ключевые слова: нанослои, неустойчивость, поверхность, дисперсионное уравнение, декремент, длина волны.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-10-679-687

В последние три десятилетия внимание исследователей в области физического материаловедения привлечено к изучению и созданию наноструктур за счет различных внешних энергетических воздействий, обеспечивающих комплекс повышенных эксплуатационных свойств [1 – 5]. Несмотря на многочисленные выполненные исследования [6 – 10] и их анализ на международных конференциях по нанотематике в вопросах механизмов формирования наноструктурно-фазовых состояний и причин повышенных прочностных свойств металлов и сплавов еще много неясностей. Имеющиеся к настоящему времени результаты носят частный характер и не дают возможности сделать серьезные обобщения о природе и основных закономерностях поведения наноструктур при различных внешних энергетических воздействиях. Одним из перспективных направлений решения этих задач может явиться адекватное математическое моделирование.

Анализу формирования наноструктурных образований в материалах в результате развития неустойчивостей в микро- и наномасштабах равновесных состояний в поверхностных слоях при различных внешних энергетических воздействиях и посвящена эта работа. Такой подход является принципиально новым и ранее не предлагался.

Рассматриваемая неустойчивость Кельвина–Гельмгольца (НКГ) возникает на границе раздела двух сред, движущихся параллельно друг другу. Необходимым условием ее образования является наличие тангенциального разрыва скоростей [11]. При этом принимается, что одна среда описывается моделью идеальной жидкости, а вторая – вязкой; анализ дисперсионного уравнения ведется в приближении коротких длин волн.

Формирование наноструктурных слоев при электровзрывном легировании

При обработке металлов и сплавов импульсными плазменными струями, сформированными при электрическом взрыве проводников с различными

* Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ № 15-08-03411 (раздел 2.1), № 16-48-420530 (раздел 2.3), РНФ № 15-19-00065 (раздел 2.2), 15-12-00010 (раздел 2.4).

Публикуется в порядке дискуссии.

упрочняющими порошковыми навесками, происходит формирование зоны легирования с градиентной структурой [12 – 20], размер кристаллитов которой составляет приблизительно 10 нм. В работах [21 – 26] были разработаны модели и предложены механизмы формирования упрочненных слоев при электровзрывном легировании (ЭВЛ). Метод ЭВЛ основан на использовании гетерогенных плазменных потоков, образующихся при электрическом взрыве проводников. Эти потоки в виде струи направляются на обрабатываемую поверхность. При натекании струи на упрочняемую поверхность возникает область параллельного течения плазмы и расплава, имеющих различные скорости, в результате развивается НКГ. При ее эволюции в приповерхностном слое расплава образуются мелкоразмерные конвективные вихри, которые в последующем при резком охлаждении расплава определяют размер структурных составляющих зоны легирования.

На рис. 1 представлено изображение поверхности никеля после ЭВЛ, где четко видны наноразмерные ячейки. На рис. 2 показаны зависимости декремента (α) от длины волны (λ): максимум приходится на длину волны (λ_m) примерно 10 – 20 нм, что соответствует экспериментальным результатам [21 – 26].

Максимумы зависимости $\alpha(\lambda)$ при положительных значениях декремента достигаются при определенных длинах волн. Значит, развитие получают волны и генерируемые ими вихри размером примерно λ_m , а волны с другими длинами и, следовательно, другие масштабы не разовьются. В работе [23] для полубесконечных слоев вязкой и идеальной жидкостей получено дисперсионное уравнение, приведен численный анализ в наноразмерном диапазоне длин волн. Управляющим параметром явилась скорость относительного скольжения слоев.

Идея использования этого механизма для второго внутреннего нанослоя приведена в работе [27], в которой выписана соответствующая математическая

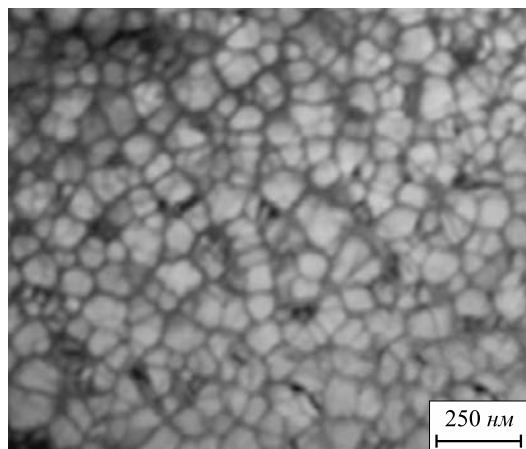


Рис. 1. Микроструктура поверхности при ЭВЛ никеля

Fig. 1. Surface microstructure at electro-explosive alloying of nickel

модель и показано, что при некоторых условиях возможны два масштаба возникновения неустойчивости в нано- и микродиапазонах. В этом случае управляющим параметром является толщина верхнего слоя.

Формирование поверхностных наноструктур в материале при электронно-пучковой обработке

Обработка поверхности металлов и сплавов низкоэнергетическими сильноточными электронными пучками приводит к формированию поверхностных наноструктур [28]. На рис. 3 представлено изображение поверхности железа после воздействия ЭПО, средний размер ячеек составляет приблизительно 200 нм.

В основе модели формирования наноструктур лежит представление о том, что вследствие наличия градиента температур возникает термокапиллярная неустойчивость Марангони [29 – 33], которая приводит к образованию ячеистых структур. При выводе дисперсионного уравнения использовали трехмерные уравнения Навье-Стокса и теплопроводности. Граничные условия на поверхности расплава имеют вид:

$$-p + 2\nu\rho \frac{\partial w}{\partial y} = \sigma \left(\frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \eta}{\partial y^2} \right);$$

$$\rho v \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) = \frac{\partial \sigma}{\partial x}; \quad \rho v \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) = \frac{\partial \sigma}{\partial y};$$

где u, v, w – компоненты вектора возмущения скорости; p – возмущение давления; η – возмущение границы раз-

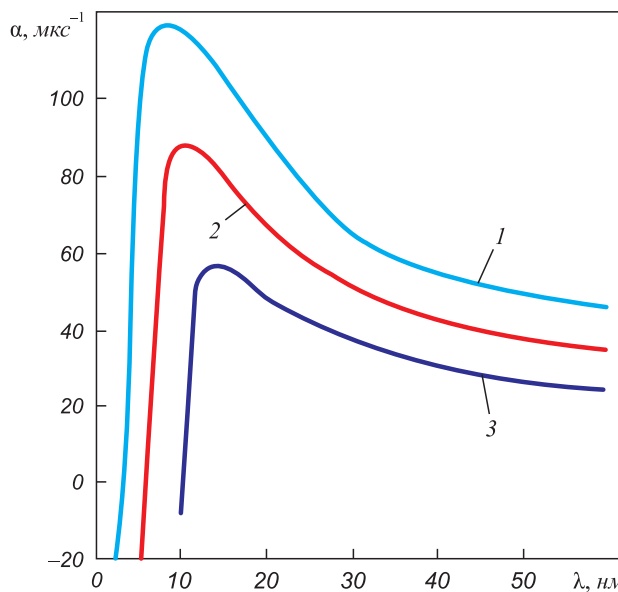


Рис. 2. Зависимость декремента неустойчивости от длины волны при относительной скорости течения на границе плазма – расплав: 1 – 760 м/с; 2 – 650 м/с; 3 – 350 м/с

Fig. 2. Dependence of an instability decrement on a wave length at a relative flow velocity at the boarder of plasma – melt: 1 – 760 m/s; 2 – 650 m/s; 3 – 350 m/s

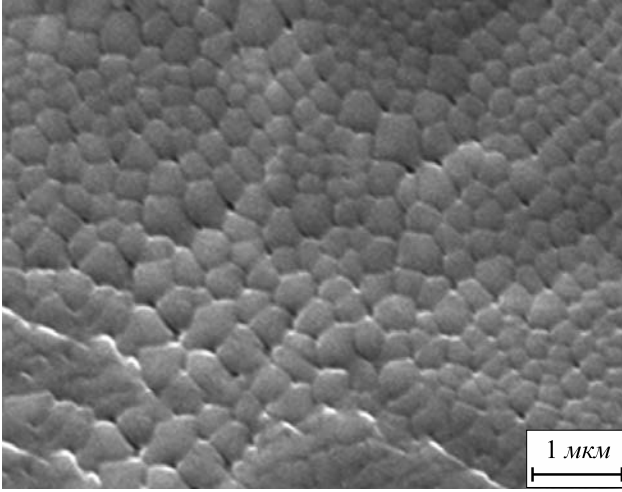


Рис. 3. Поверхностные ячейки при ЭПО поверхности железа

Fig. 3. Surface cells at electron-beam treatment of an iron surface

дела; ν – кинематическая вязкость; σ – поверхностное натяжение; ρ – плотность; T – возмущение температуры.

Условия прилипания и отсутствия температурных возмущений на границе расплав–твёрдое тело имеют вид

$$u = v = w = 0; T = 0.$$

При использовании нормальных мод получено дисперсионное уравнение для конечного слоя. Однако его анализ сопряжен со значительными трудностями, поэтому использовали дисперсионное уравнение для полубесконечного слоя:

$$\begin{aligned} & \omega^2 \left[(\omega + 2\nu k^2)^2 - 4k_1 k^2 \nu^2 + \omega_c^2 \right] - \\ & - \omega_T^2 \left\{ \left[1 + \delta \left(1 - \frac{k_1}{k_2} \right) \right] (\omega^2 + 2k^2 \nu \omega + \omega_c^2) - \right. \\ & \left. - \frac{k}{k_2} (2k k_1 \nu \omega + \omega_c^2) \right\} = 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где $\delta = \frac{\varepsilon}{1-\varepsilon}$; $k_1^2 = \frac{\omega}{\nu} + k^2$; $k_2^2 = \frac{\omega}{\chi} + k^2$; $\omega_c^2 = \frac{k^3 \sigma_0}{\rho}$; $\omega_T^2 = \frac{k^2 \sigma_T G_0}{\rho}$; $\omega_\nu = \nu k^2$; $G_0 = \frac{dT_0}{dz}$; ε – число Прандтля.

Уравнение (1) может быть сведено к алгебраическому уравнению 16-ой степени. Оно зависит от трех безразмерных параметров: числа Прандтля и двух квадратов отношений частот a^2 и b^2 ($a = \omega_c/\omega_\nu$, $b = \omega_T/\omega_\nu$). При малых числах Прандтля уравнение (1) распадается на два:

$$\begin{aligned} & (z^3 + z^2 + 3z - 1)(z^2 - 1)^2(z - 1) - b^2(z^2 - 1)(z + 1)^2 + \\ & + a^2(z^2 - 1)^2 - 2a^2 b^2 = 0; \\ & (z^3 + z^2 + 3z - 1)(z^2 - 1) - b^2(z - 1) + a^2(z + 1) = 0; \end{aligned}$$

здесь

$$z = \frac{k_1}{k}; a^2 = a_0^2 \frac{k_0}{k}; b^2 = b_0^2 \frac{k_0^2}{k^2}; a_0^2 = \frac{\sigma_0}{\nu^2 \rho k_0}; b_0^2 = \frac{\sigma_T G_0}{\nu^2 k_0}.$$

Для численных расчетов принимаем: $k_0 \approx 10^7 \text{ м}^{-1}$, $h \approx 10^{-5} \text{ м}$, $G_0 \approx (T_b - T_m)/h \approx 10^8 \text{ К/м}$; T_b и T_m – температуры плавления и кипения.

На рис. 4 представлена зависимость безразмерного декремента от волнового числа (k/k_0): максимум декремента приходится на волновое число $5,61 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$, что соответствует длине волны 112 нм. Эти значения несколько отличаются от экспериментальных [34]. Однако в работе [34] исследовали перлитную сталь, а, как известно, углерод оказывает влияние на поверхностное натяжение железа. С ростом градиента температуры значения волнового числа резко возрастают, достигая при толщине жидкого слоя 100 нм значения $1,29 \cdot 10^5 \text{ м}^{-1}$, что соответствует длине волны 4,86 нм.

Формирование наноразмерных фаз при термомеханическом упрочнении проката

Термомеханическое упрочнение проката в потоке непрерывных станов является одним из наиболее прогрессивных технологических процессов, обеспечивающих существенное повышение механических и эксплуатационных свойств изделий, изготавливаемых из низколегированных сталей за счет формирования упрочненных слоев при ускоренном охлаждении поверхности потоками воды.

В условиях прерывистой закалки в поверхностных слоях проката формируется структура, содержащая наноразмерные упрочняющие фазы [35 – 43]. Были выявлены основные параметры охлаждения, которые обеспечивают формирование закалочных поверхност-

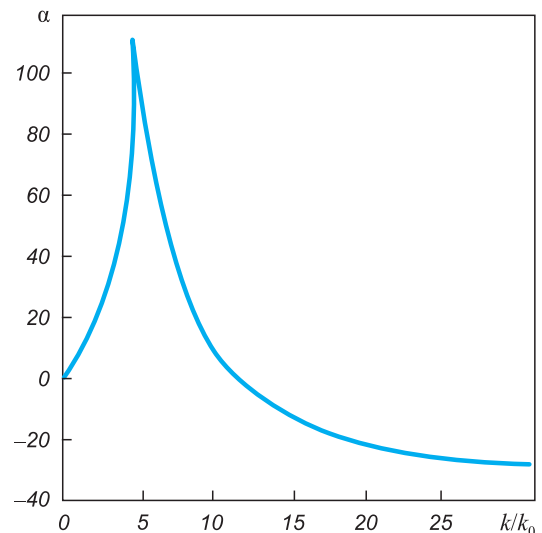


Рис. 4. Зависимость безразмерного декремента от волнового числа

Fig. 4. Dependence of a nondimensional decrement on a wave number

ных структур и прямолинейность проката [44 – 46]. В работе [46] рассмотрены этапы становления способа термического упрочнения проката; отмечается, что устойчивый технологический процесс возможен только начиная с определенной скорости воды относительно проката. Эту скорость определили экспериментально (без рассмотрения механизма взаимодействия воды и проката). Используя выше предложенную идею формирования НКГ в наноразмерном диапазоне длин волн, можно предположить механизм охлаждения проката. При температуре проката приблизительно 1000 °С между водой и прокатом при недостаточных скоростях относительного движения образуется пленка пара, которая значительно снижает теплопередачу. При скоростях больше критической возникает НКГ в нанодиапозоне, что приводит к формированию нанокაпель. Охлаждение ведется с помощью нанокაпель, движущихся через такую пленку, что позволяет при моделировании структурно-фазовых превращений использовать коэффициент теплоотдачи, рассчитанный по формуле, в которую входит теплопроводность воды [47].

Вторая роль нанокაпель, на взгляд авторов, состоит в генерации теплового удара, за счет которого формируются мощные термоупругие волны, рассмотрение которых при наносекундных воздействиях проведено в работе [48]. Роль упругих волн заключается в повышении ударной вязкости, так как возникшие на первой стадии охлаждения трещины в последующих секциях при взаимодействии упругой волны со свободными берегами трещин захлопываются [49, 50].

Образование наноструктур в рельсовой стали при длительной эксплуатации

Ранее в работе [51] обнаружено, что в рельсах из перлитной стали при длительной эксплуатации образуются белые слои, обладающие высокой твердостью. Электронно-микроскопические исследования этих слоев показали, что их структура крайне неоднородна, размеры зерен имеют бимодальное распределение и изменяются от 20 до 500 нм [52]. Пластины цементита в таких условиях изогнуты или разрушены, на межфазной границе феррит–цементит отмечается крайне высокая плотность дислокаций. Микроструктура зоны упрочненного слоя во многом подобна структуре, наблюдаемой в условиях интенсивной пластической деформации [53]. По мнению авторов работ [51 – 53] за образование наноструктур отвечают процессы, аналогичные механическому легированию, что не в полной мере отражает реальные процессы в головке рельсов при длительной эксплуатации. Изучение процесса трения скольжения [54, 55] показывает, что нанослои формируются за счет сдвига одной части материала относительно другой с образованием резкой границы. В работе [55] предложено объяснение этого механизма на основе теории Рейнольдса, но и оно не отража-

ет полной картины процессов, протекающих при интенсивной пластической деформации и приводящих к образованию наноразмерных структур.

Как известно, при эксплуатации в системе колесо–рельс возникает участок скольжения. Под действием сил трения происходит движение поверхностного слоя рельса относительно нижележащих слоев. На поверхности раздела таких слоев имеет место тангенциальный разрыв скорости и, соответственно, возникает неустойчивость Кельвина–Гельмгольца. В рамках этой модели поверхностный слой рельса считается идеальной жидкостью, а нижележащий упругодеформированный слой (подложка) – вязкой. В работах [26, 56] для таких систем было получено дисперсионное уравнение, которое имеет следующий вид:

$$(2vk^2 + \omega)^2 + \mu(\omega + iku_0)^2 + \omega_0^2 = 4\sqrt{v^3k^6(vk^2 + \omega)},$$

где v – кинематическая вязкость; $\mu = \frac{\rho_2}{\rho_1} \coth(kH)$;

k – волновое число; $\omega_0^2 = \frac{\sigma_0}{\rho_1} k^3$; u_0 – относительная скорость слоев; $\omega = \alpha + i\Omega$ – комплексная циклическая частота; α и Ω – декремент и инкремент неустойчивости; H – толщина поверхностного слоя; σ_0 – поверхностное натяжение; ρ_1 и ρ_2 – плотность материала подложки и поверхностного слоя.

Для коротковолновых возмущений получена следующая аналитическая зависимость декремента неустойчивости от длины волны возмущений:

$$\alpha = \frac{vk^2}{1 + \mu} + \sqrt{\frac{\delta + \sqrt{\delta^2 + 4a^2b^2}}{2}},$$

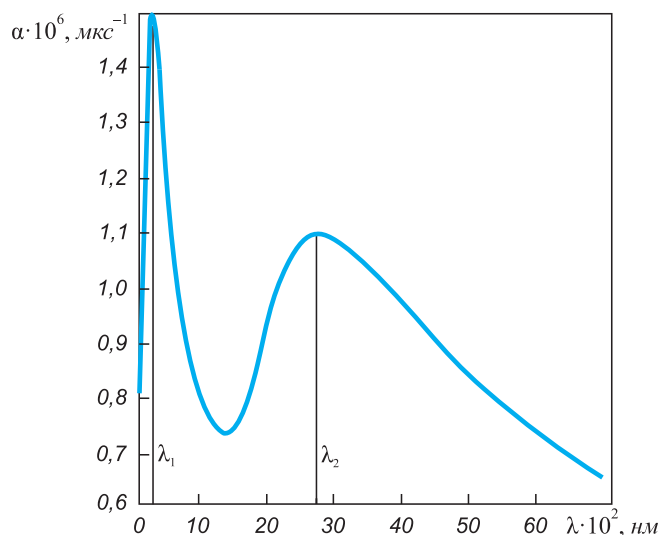


Рис. 5. Зависимость декремента неустойчивости от длины волны возмущения границы раздела

Fig. 5. Dependence of an instability decrement on a disturbance wave length of an interface

$$\text{где } \delta = a^2 + \delta_0; a = \frac{vk^2}{1+\mu}; \delta_0 = \frac{k^2 [\mu \rho_1 u_0^2 - k \sigma_0 (1+\mu)]}{(1+\mu)^2 \rho_1}.$$

Подставляя в уравнение (2) значения a и δ и учитывая, что $k = 2\pi/\lambda$, получим зависимость декремента от длины волны возмущения границы раздела. На рис. 5 приведены результаты расчетов для стали ($\sigma_0 = 1,91$ Н/м; $\rho_1 = 7800$ кг/м³; $v = 3 \cdot 10^{-6}$ м²/с [57]). Считаем, что $\mu \approx 10$, $u_0 = 30$ м/с. Зависимость декремента от длины волны имеет два максимума: первый максимум приходится на длину волны 319 нм, второй – 2,7 мкм. Размеры зерен, наблюдающихся в рельсах, снятых после пропущенного тоннажа 500 и 1000 млн. т брутто, имеют такой же порядок [58, 59]. Бимодальный характер распределения зерен в белом слое [53] указывает на то, что неустойчивость Кельвина–Гельмгольца может быть ответственна за его образование. Отметим, что формула (2) пригодна для численных расчетов, но для получения аналитических выражений волновых чисел, при которых достигаются экстремальные значения α , приводит к громоздким выражениям, из которых трудно выявить физический смысл. Поэтому найдем простые приближенные выражения, справедливые вблизи максимумов и явно зависящие от параметров задачи. В случае отсутствия вязкости волновое число и длина волны, на которые приходится максимум декремента, имеют вид: $k_m = \frac{2}{3} \frac{\mu \rho_1 u_0^2}{(1+\mu) \sigma_0}$, $\lambda_m = \frac{\pi (1+\mu) \sigma_0}{3 \mu \rho_1 u_0^2}$. Для

выбранных значений характеристик материала получим $k_m = 2,23 \cdot 10^6$ м⁻¹, $\lambda_m = 2,82$ мкм. В случае $v \neq 0$ максимальные значения декремента неустойчивости будут наблюдаться при $\bar{k}_{m1} = \frac{9}{16} \mu$ и $\bar{k}_{m2} = \frac{2}{3} + \frac{8}{3} \sqrt{\frac{\varepsilon}{3}}$, где $\bar{k} = \frac{k}{k_0}$;

$k_0 = \frac{\mu \rho_1 u_0^2}{(1+\mu) \sigma_0}$. Тогда $k_{m1} = 1,89 \cdot 10^7$ м⁻¹, $\lambda_{m1} = 332$ нм и $k_{m2} = 2,41 \cdot 10^6$ м⁻¹, $\lambda_{m2} = 2,6$ мкм. Отличие полученных значений от рассчитанных по формуле (2) незначительно. Размеры фрагментов в поверхностном слое рельсов при пропущенном тоннаже 500 млн. т брутто составляют 250 – 300 нм [58, 59] и уменьшаются в два раза при пропущенном тоннаже 1000 млн. т брутто. Это позволяет сделать вывод о том, что представленная модель адекватно описывает наблюдающиеся закономерности формирования наноструктур.

Выводы. Предложенные механизмы формирования наноструктурных образований при электровзрывном поверхностном легировании, электронно-пучковой обработке, термомеханическом упрочнении проката и длительной эксплуатации рельсов, основанные на возникновении гидродинамических неустойчивостей Кельвина–Гельмгольца и Марангони на границе раздела сред, не противоречат экспериментально наблюдаемым закономерностям и могут явиться основой прогнозирования появления наноструктур при внешних энергетических воздействиях.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Наноматериалы: структура, свойства и применение / А.М. Глезер, В.Е. Громов, Ю.Ф. Иванов, Ю.П. Шаркеев. – Новокузнецк: Интер-Кузбасс, 2012. – 423 с.
2. Soskova N.A., Budovskikh E.A., Gromov V.E., Raikov S.V., Ivanov Y.F. Formation of dislocation-free nanostructures in metals on electroexplosive alloying // *Steel in Translation*. 2012. Vol. 42. No. 12. P. 820 – 822.
3. Efimov O.Y., Yur'ev A.B., Ivanov Y.F., Gromov V.E., Piskalenko V.V. Evolution of the structural and phase states in a plasma-hardened iron roller // *Steel in Translation*. 2012. Vol. 42. No. 6. P. 489 – 494.
4. Gromov V.E., Yur'ev A.B., Morozov K.V., Ivanov Yu.F. Microstructure of quenched rails. – Cambridge: CISP, 2016. – 225 p.
5. Шахпазов Е.Х., Глезер А.М. Перспективы применения наноматериалов в черной металлургии // *Проблемы черной металлургии и материаловедения*. 2007. № 1. С. 66 – 69.
6. Глезер А.М., Громов В.Е. Наноматериалы, созданные путем экстремальных воздействий. – Новокузнецк: Интер-Кузбасс, 2010. – 171 с.
7. Многофункциональные конструкционные материалы нового поколения / Под ред. В.Е. Громова. – Новокузнецк: изд. СибГИУ, 2015. – 298 с.
8. Валиев Р.З., Еникеев Н.А., Мурашкин М.Ю., Утяшев Ф.З. Использование интенсивных пластических деформаций для получения объемных наноструктурных металлических материалов // *Известия РАН. Механика твердого тела*. 2012. № 4. С. 106 – 119.
9. Валиев Р.З., Рааб Г.И., Боткин А.В., Дубинина С.В. Получение ультрамелкозернистых металлов и сплавов методами интенсивной пластической деформации: новые подходы к разработке технологий // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2012. № 8. С. 44 – 47.
10. Андриевский Р.А. Металлические нано- и микростекала: новые подходы в наноструктурном материаловедении // *Успехи физических наук*. 2013. № 3. С. 277 – 285.
11. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т. 6. Гидродинамика. – М.: Наука, 1986. – 736 с.
12. Физические основы электровзрывного легирования металлов и сплавов / А.Я. Багаутдинов, Е.А. Будовских, Ю.Ф. Иванов, В.Е. Громов. – Новокузнецк: изд. СибГИУ, 2007. – 307 с.
13. Ivanov Y.F., Budovskikh E.A., Gromov V.E., Bashchenko L.P., Soskova N.A., Raikov S.V. Formation of nanocomposite layers at the surface of VT1-0 titanium in electroexplosive carburization and electron-beam treatment // *Steel in Translation*. 2012. Vol. 42. No. 6. P. 499 – 501.
14. Sizov V.V., Gromov V.E., Vorob'ev S.V., Kononov S.V., Ivanov Y.F. Fatigue failure of stainless steel after electron-beam treatment // *Steel in Translation*. 2012. Vol. 42. No. 6. P. 486 – 488.
15. Башенко Л.П., Соскова Н.А., Иванов Ю.Ф. и др. Влияние электронно-пучковой обработки на структуру и микротвердость поверхности технически чистого титана VT1-0 после электровзрывного науглероживания // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2012. Т. 9. № 1. С. 15 – 22.
16. Будовских Е.А., Иванов Ю.Ф., Громов В.Е. и др. Структура и микротвердость поверхностных слоев технически чистого титана VT1-0 после электровзрывного науглероживания и последующей электронно-пучковой обработки // *Авиационная промышленность*. 2012. № 2. С. 44 – 48.
17. Romanov D.A., Budovskikh E.A., Zhmakin Y.D., Gromov V.E. Surface modification by the EVU 60/10 electroexplosive system // *Steel in Translation*. 2011. Vol. 41. No. 6. P. 464 – 468.
18. Karpil S.V., Morozov M.M., Ivanov Y.F., Budovskikh E.A., Gromov V.E. Formation of nanophases in electroexplosive alloying with aluminum and boron and electron-beam treatment of titanium surfaces // *Steel in Translation*. 2010. Vol. 40. No. 8. P. 723 – 728.

19. Иванов Ю.Ф., Будовских Е.А., Громов В.Е. и др. Формирование градиентной структуры поверхностных слоев технически чистого титана BT1-0 при электровзрывном науглероживании и последующей электронно-пучковой обработке // Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2013. № 1. С. 59 – 63.
20. Башенко Л.П., Иванов Ю.Ф., Будовских Е.А. Модификация структуры поверхностных слоев титана BT1-0 при электровзрывном карбоборировании и электронно-пучковой обработке // Изв. вуз. Черная металлургия. 2013. № 3. С. 68 – 70.
21. Молотков С.Г., Башенко Л.П., Будовских Е.А., Громов В.Е. Моделирование нагрева поверхности металла при электровзрывном легировании с учетом формы теплового импульса // Изв. вуз. Черная металлургия. 2013. № 6. С. 44 – 46.
22. Молотков С.Г., Башенко Л.П., Будовских Е.А., Громов В.Е. Моделирование нагрева поверхности металла, подвергнутого электровзрывному легированию, при последующей электронно-пучковой обработке // Изв. вуз. Черная металлургия. 2013. № 8. С. 43 – 45.
23. Сарычев В.Д., Ващук Е.С., Будовских Е.А., Громов В.Е. Образование наноразмерных структур в металлах при воздействии импульсных плазменных струй электрического взрыва // Письма в Журнал технической физики. 2010. № 14. С. 41 – 48.
24. Сарычев В.Д., Мочалов С.П., Будовских Е.А. и др. Математическое моделирование и исследование формирования конвективных структур в металлах и сплавах при воздействии импульсных многофазных плазменных струй // Изв. вуз. Черная металлургия. 2010. № 6. С. 44 – 49.
25. Молотков С.Г., Ващук Е.С., Будовских Е.А., Громов В.Е. Математическая модель формирования границы зоны электровзрывного легирования с основой металла // Изв. вуз. Черная металлургия. 2012. № 4. С. 53 – 56.
26. Грановский А.Ю., Сарычев В.Д., Громов В.Е. Модель формирования внутренних нанослоев при сдвиговых течениях материалов // Журнал технической физики. 2013. Т. 83. Вып. 10. С. 155 – 158.
27. Сарычев В.Д., Грановский А.Ю., Черемушкина Е.В., Громов В.Е. Модель перемешивания слоев, созданных при электровзрывной обработке // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2013. № 4. С. 558 – 562.
28. Модификация структуры и свойств эвтектического силумина электронно-ионно-плазменной обработкой / А.П. Ласковнев, Ю.Ф. Иванов, Е.А. Петрикова и др. – Минск: Белорусская наука, 2013. – 287 с.
29. Khaimzon B.B., Sarychev V.D., Soskova N.A., Gromov V.E. Temperature distribution produced by pulsed energy fluxes, with evaporation of the target // Steel in Translation. 2013. Vol. 43. No. 2. P. 55 – 58.
30. Sarychev V.D., Mochalov S.P., Budovskikh E.A., Vashchuk E.S., Gromov V.E. Formation of convective structures in metals and alloys under the action of pulsed multiphase plasma jets // Steel in Translation. 2010. Vol. 40. No. 6. P. 531 – 536.
31. Lee P.D., Quested P.N., McLean M. Modelling of Marangoni effects in electron beam melting // Phil. Trans. R. Soc. Lond. A. 1998. Vol. 356. P. 1027 – 1043.
32. Zen'kovskaya S.M. Long-wave oscillatory Marangoni instability in a horizontal liquid layer // J. Appl. Math. and Mech. 2007. Vol. 71. P. 755 – 761.
33. Sarychev V.D., Nevskii S.A., Kononov S. V., Komissarova I. A., Cheremushkina E.V. Thermocapillary model of formation of surface nanostructure in metals at electron beam treatment // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2015. Vol. 91. No. 012028 (9 p).
34. Grishunin V.A., Gromov V.E., Kononov S.V., Ivanov Y.F., Teregov A.D. Evolution of the phase composition and defect substructure of rail steel subjected to high-intensity electron-beam treatment // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron techniques. 2013. Vol. 7. P. 990 – 995.
35. Ефимов О.Ю., Костерев В.Б., Громов В.Е. и др. Закономерности и механизмы формирования структурно-фазовых состояний и механических свойств балочного профиля из стали 09Г2С при термомеханическом упрочнении // Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2010. № 3. С. 13 – 21.
36. Belov E.G., Efimov O.Y., Ivanov Y.F., Gromov V.E., Kolubayeva Y.A. Formation of the structural and phase states in hardened cast iron rollers. Part 1 // Steel in Translation. 2010. Vol. 40. No. 4. P. 322 – 324.
37. Kosterev V.B., Efimov O.Y., Ivanov Y.F., Belov E.G., Gromov V.E. Formation of gradient structure-phase states in thermomechanical hardening // Steel in Translation. 2011. Vol. 41. No. 4. P. 283 – 286.
38. Efimov O.Yu., Ivanov Yu.F., Kononov S.V., Gromov V.E. Gradient structural-phase states in the thermostrengthened low-carbon steel reinforcement // Materials and manufacturing processes. 2011. Vol. 26. P. 144 – 146.
39. Belov E.G., Efimov O.Y., Yur'ev A.B., Ivanov Y.F., Gromov V.E. Evolution of the structural-phase state of the surface of plasma-hardened rollers // Steel in Translation. 2011. Vol. 41. No. 2. P. 102 – 104.
40. Belov E.G., Poltoratskii L.M., Efimov O.Y., Kononov S.V., Gromov V.E. Formation of structure and mechanical properties in the accelerated cooling of an H beam // Steel in Translation. 2010. Vol. 40. No. 2. P. 114 – 118.
41. Belov E.G., Kopylov I.V., Dikan' O.V., Gromov V.E. Production of DP155 I-beams for monorail tracks // Steel in Translation. 2010. Vol. 40. No. 10. P. 873 – 875.
42. Ефимов О.Ю., Чинокалов В.Я., Юрьев А.Б. и др. Закономерности формирования структурно-фазовых состояний и механических свойств при ускоренном охлаждении двутавра // Изв. вуз. Черная металлургия. 2011. № 4. С. 16 – 19.
43. Костерев В.Б., Ефимов О.Ю., Иванов Ю.Ф. и др. Формирование градиентных структурно-фазовых состояний при термомеханическом упрочнении // Изв. вуз. Черная металлургия. 2011. № 4. С. 24 – 27.
44. Сидоренко О.Г., Федорова И.П., Демченко Е.М. и др. Виды разрушений термомеханически упрочненной высокопрочной арматуры, подверженной водородному охрупчиванию. – В кн.: Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. – Киев: Наукова думка, 1995. С. 222 – 229.
45. Сидоренко О.Г. Новые технологические решения процесса термомеханического упрочнения арматурной стали. – В кн.: Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. Вып. 3. – Киев: Наукова думка, 1999. С. 306 – 311.
46. Узлов И.Г., Сидоренко О.Г., Федорова И.П. и др. Новое в технологии управления процессом термического упрочнения арматурного проката // Металлургическая и горнорудная промышленность. 2008. № 1. С. 89 – 91.
47. Большаков В.И. История развития термического упрочнения проката: монография. – Днепропетровск: ПГАСА, 2012. – 388 с.
48. Сарычев В.Д., Волошина М.С., Громов В.Е. Математическая модель генерации термоупругих волн при воздействии концентрированных потоков энергии на материалы // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2011. Т. 8. № 4. С. 71 – 77.
49. Морозов С.И., Погорелов А.И., Демченко Е.М. и др. Повышение стойкости против коррозионного растрескивания под напряжением термомеханически упрочненной арматурной стали // Сталь. 1994. № 6. С. 66 – 69.
50. Sarychev V.D., Granovskii A.Yu., Nevskii S.A., Gromov V.E. Model of formation of droplets during electric arc surfacing of functional coatings // AIP Conference Proceedings. 2016. Vol. 1698. No. 030013 (5 p).
51. Lojkowski W., Millman Y., Chugunova S.I., Goncharova I.V., Djahanbakhsh M., Bürkle G., Fecht H.-J. The mechanical properties of the nanocrystalline layer on the surface of railway tracks //

- Materials Science and Engineering: A. 2003. Vol. 303. No. 1-2. P. 209 – 215.
52. Ivanisenko Yu., Fecht H.J. Microstructure modification in the Surface Layers of Railway Rails and Wheels: Effect of High Strain Rate Deformation // *Steel tech.* 2008. Vol. 3. No. 1. P. 19 – 23.
 53. Ivanisenko Yu., Lojowski W., Valiev R.Z., Fecht H.-J. The mechanism of formation of nanostructure and dissolution of cementite in a pearlitic steel during high pressure torsion // *Acta Mater.* 2003. Vol. 51. No. 18. P. 5555 – 5570.
 54. Тарасов С.Ю., Рубцов В.Е. Сдвиговая неустойчивость в подповерхностном слое материала при трении // *Физика твердого тела.* 2011. Т. 53. № 2. С. 336 – 340.
 55. Tarasov S., Rubtsov V., Kolubaev A. Subsurface shear instability and nanostructuring of metals in sliding // *Wear.* 2010. Vol. 268. No. 1. P. 59 – 66.
 56. Sarychev V.D., Nevskii S.A., Granovskii A.Yu., Gromov V.E. Mathematical model of nanostructure formation in rail steel under high intensive mechanical loading // *AIP Conf. Proc.* 2015. Vol. 1683. No. 020200 (4 p).
 57. Физические величины: Справочник / Под. ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.
 58. Иванов Ю.Ф., Громов В.Е., Перегудов О.А. и др. Эволюция структурно-фазовых состояний рельсов при длительной эксплуатации // *Изв. вуз. Черная металлургия.* 2015. № 4. С. 262 – 266.
 59. Громов В.Е., Перегудов О.А., Иванов Ю.Ф. и др. Эволюция структуры и свойств поверхностного слоя рельсов при длительной эксплуатации // *Вопросы материаловедения.* 2015. № 3 (83). С. 30 – 37.

Поступила 5 апреля 2016 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2016. Vol. 59. No. 10, pp. 679–687.

NANOLAYERS FORMATION AT HYDRODYNAMIC INSTABILITY DEVELOPMENT UNDER THE EXTERNAL ENERGY EFFECTS

V.D. Sarychev¹, V.E. Gromov¹, S.A. Nevskii¹, A.I. Nizovskii², S.V. Konovalov¹

¹ Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

² Boreskov Institute of Catalysis SB RAS, Novosibirsk, Russia

Abstract. The attempt to interpret the experimentally established regularities of strengthening surface nanostructures formation under different energy effects (electro-explosive alloying, electron-beam treatment, rolling products thermomechanical strengthening due to accelerated cooling, severe mechanical action at long term operation) was made on unified position. The mathematical modeling of nanostructured states formation in consideration of equilibrium states instabilities development in surface layers (Kelvin–Helmholtz and Marangoni instabilities) was carried out, the corresponding dispersion equations were analyzed and the analytical dependences of instability decrement α on perturbation wave length λ in micro and nanoranges were established. The correspondence of numerical values of maximum observed on the $\alpha(\lambda)$ dependences to experimental nanostructure parameters was noted and its physical interpretation was made.

Keywords: nanolayer, instability, surface, dispersion equation, decrement, wave length.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-10-679-687

REFERENCES

1. Glezer A.M., Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Sharkeev Yu.P. *Nanomaterialy: struktura, svoystva i primeneniye* [Nanomaterials: structure, properties and usage]. Novokuznetsk: Inter-Kuzbass, 2012, 423 p. (In Russ.).
2. Soskova N.A., Budovskikh E.A., Gromov V.E., Raikov S.V., Ivanov Y.F. Formation of dislocation-free nanostructures in metals on electroexplosive alloying. *Steel in Translation.* 2012, vol. 42, no. 12, pp. 820–822.
3. Efimov O.Y., Yur'ev A.B., Ivanov Y.F., Gromov V.E., Piskalenko V.V. Evolution of the structural and phase states in a plasma-hardened iron roller. *Steel in Translation.* 2012, vol. 42, no. 6, pp. 489–494.
4. Gromov V.E., Yur'ev A.B., Morozov K.V., Ivanov Yu.F. *Microstructure of quenched rails.* Cambridge: CISP, 2016, 225 p.
5. Shakhpazov E.Kh., Glezer A.M. Usage opportunities of nanomaterials in non-ferrous metallurgy. *Problemy chernoi metallurgii i materialovedeniya.* 2007, no. 1, pp. 66–69. (In Russ.).
6. Glezer A.M., Gromov V.E. *Nanomaterialy, sozdannye putem ekstremal'nykh vozdeystviy* [Nanomaterials, created by the way of an extreme influences]. Novokuznetsk: Inter-Kuzbass, 2010, 171 p. (In Russ.).
7. *Mnogofunktsional'nye konstruksionnye materialy novogo pokoleniya* [Multifunctional structural materials of a new generation]. Gromov V.E. ed. Novokuznetsk: izd. SibGIU, 2015, 298 p. (In Russ.).
8. Valiev R.Z., Enikeev N.A., Murashkin M.Yu., Utyashev F.Z. Using intensive plastic deformations for manufacturing bulk nanostructure metallic materials. *Mechanics of Solids.* 2012, vol. 47, no. 4, pp. 463–474.
9. Valiev R.Z., Raab G.I., Botkin A.V., Dubinina S.V. Obtaining of ultra-fine-grained metals and alloys using the intensive plastic deformation: new approaches to the technology development. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy.* 2012, no. 8, pp. 44–47. (In Russ.).
10. Andrievskii R.A. Metal nano- and microglasses: new approaches in nanostructural material science. *Uspekhi fizicheskikh nauk.* 2013, no. 3, pp. 277–285. (In Russ.).
11. Landau L.D., Lifshits E.M. *Teoreticheskaya fizika. T. 6. Gidrodinamika* [Theoretical physics. Vol. 6. Hydrodynamics]. Moscow: Nauka, 1986, 736 p. (In Russ.).
12. Bagautdinov A.Ya., Budovskikh E.A., Ivanov Yu.F., Gromov V.E. *Fizicheskie osnovy elektrovzryvnogo legirovaniya metallov i splavov* [Physical basics of electro-explosive alloying of metals and alloys]. Novokuznetsk: izd. SibGIU, 2007, 307 p. (In Russ.).
13. Ivanov Y.F., Budovskikh E.A., Gromov V.E., Bashchenko L.P., Soskova N.A., Raikov S.V. Formation of nanocomposite layers at the surface of VT1-0 titanium in electroexplosive carburization and electron-beam treatment. *Steel in Translation.* 2012, vol. 42, no. 6, pp. 499–501.
14. Sizov V.V., Gromov V.E., Vorob'ev S.V., Konovalov S.V., Ivanov Y.F. Fatigue failure of stainless steel after electron-beam treatment. *Steel in Translation.* 2012, vol. 42, no. 6, pp. 486–488.
15. Bashchenko L.P., Soskova N.A., Ivanov Yu.F., Teresov A.D., Raikov S.V., Budovskikh E.A., Gromov V.E. Influence of electron-beam treatment on the structure and microhardness of a surface of a commercially pure titanium VT1-0 after electro-explosive carburizing. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya.* 2012, vol. 9, no. 1, pp. 15–22. (In Russ.).
16. Budovskikh E.A., Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Raikov S.V., Bashchenko L.P., Ionina A.V. Structure and microhardness of a surface of a commercially pure titanium VT1-0 after electro-explosive carburizing and the subsequent electron-beam treatment. *Aviatsionnaya promyshlennost'.* 2012, no. 2, pp. 44–48. (In Russ.).
17. Romanov D.A., Budovskikh E.A., Zhmakin Y.D., Gromov V.E. Surface modification by the EVU 60/10 electroexplosive system. *Steel in Translation.* 2011, vol. 41, no. 6, pp. 464–468.

18. Karpil S.V., Morozov M.M., Ivanov Y.F., Budovskikh E.A., Gromov V.E. Formation of nanophases in electroexplosive alloying with aluminum and boron and electron-beam treatment of titanium surfaces. *Steel in Translation*. 2010, vol. 40, no. 8, pp. 723–728.
19. Ivanov Yu.F., Budovskikh E.A., Gromov V.E., Bashchenko L.P., Raikov S.V. Formation of a gradient structure of surface layers of commercially pure titanium VT1-0 at electro-explosive carburizing and the subsequent electron-beam treatment. *Poroshkovaya metallurgiya i funktsional'nye pokrytiya*. 2013, no. 1, pp. 59–63. (In Russ.).
20. Bashchenko L.P., Ivanov Yu.F., Budovskikh E.A. Modification of the titanium VT1-0 surface layers structure after electroexplosive carboborizing and electron-beam treatment. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2013, no. 3, pp. 68–70. (In Russ.).
21. Molotkov S.G., Bashchenko L.P., Budovskikh E.A., Gromov V.E. Modeling of heating the metal surface during electroexplosive alloying with different shape of the heat pulse. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2013, no. 6, pp. 44–46. (In Russ.).
22. Molotkov S.G., Bashchenko L.P., Budovskikh E.A., Gromov V.E. Modeling of surface heating of metal after electroexplosive alloying at the subsequent electron-beam treatment. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2013, no. 8, pp. 43–45. (In Russ.).
23. Sarychev V.D., Vashchuk E.S., Budovskikh E.A., Gromov V.E. Nanosized structure formation in metals under the action of pulsed electric-explosion-induced plasma jets. *Technical Physics Letters*. 2010, vol. 36, no. 7, pp. 656–659.
24. Sarychev V.D., Mochalov S.P., Budovskikh E.A., Vashchuk E.S., Gromov V.E. Metals and alloys convection structure formation at action of multi-phased impulses of plasma jets. Mathematical modeling and investigation. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2010, no. 6, pp. 44–49. (In Russ.).
25. Molotkov S.G., Vashchuk E.S., Budovskikh E.A., Gromov V.E. Mathematical model of the border zone formation of electro-explosive doping with the metal basis. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2012, no. 4, pp. 53–56. (In Russ.).
26. Granovskii A.Yu., Sarychev V.D., Gromov V.E. Model of formation of inner nanolayers in shear flows of material. *Technical Physics*. 2013, vol. 58, no. 10, pp. 1544–1547.
27. Sarychev V.D., Granovskii A.Yu., Cheremushkina E.V., Gromov V.E. Model of layer mixing, created at the electro-explosive treatment. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya*. 2013, no. 4, pp. 558–562. (In Russ.).
28. Laskovnev A.P., Ivanov Yu.F., Petrikova E.A., Koval' N.N., Uglov V.V., Cherenda N.N., Bibik N.V., Astashinskii V.M. *Modifikatsiya struktury i svoystv evtekticheskogo silumina elektronno-ionno-plazmennoi obrabotkoi* [Structure and properties modification of eutectic silumin with electron-ionic-plasma treatment]. Minsk: Belorusskaya nauka, 2013, 287 p. (In Russ.).
29. Khaimzon B.B., Sarychev V.D., Soskova N.A., Gromov V.E. Temperature distribution produced by pulsed energy fluxes, with evaporation of the target. *Steel in Translation*. 2013, vol. 43, no. 2, pp. 55–58.
30. Sarychev V.D., Mochalov S.P., Budovskikh E.A., Vashchuk E.S., Gromov V.E. Formation of convective structures in metals and alloys under the action of pulsed multiphase plasma jets. *Steel in Translation*. 2010, vol. 40, no. 6, pp. 531–536.
31. Lee P.D., Quested P.N., McLean M. Modelling of Marangoni effects in electron beam melting. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A*. 1998, vol. 356, pp. 1027–1043.
32. Zen'kovskaya S.M. Long-wave oscillatory Marangoni instability in a horizontal liquid layer. *J. Appl. Math. and Mech.* 2007, vol. 71, pp. 755–761.
33. Sarychev V.D., Nevskii S.A., Konovalov S.V., Komissarova I.A., Cheremushkina E.V. Thermocapillary model of formation of surface nanostructure in metals at electron beam treatment. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2015, vol. 91, no. 012028 (9 p).
34. Grishunin V.A., Gromov V.E., Konovalov S.V., Ivanov Y.F., Tere-sov A.D. Evolution of the phase composition and defect substructure of rail steel subjected to high-intensity electron-beam treatment. *Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron techniques*. 2013, vol. 7, pp. 990–995.
35. Efimov O.Yu., Kosterev V.B., Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Yur'-ev A.B., Konovalov S.V. Regularities and mechanisms of formation of structure-phase states and mechanical properties of a beam profile from steel 09G2S at shock hardening. *Problemy chernoi metallurgii i materialovedeniya*. 2010, no. 3, pp. 13–21. (In Russ.).
36. Belov E.G., Efimov O.Y., Ivanov Y.F., Gromov V.E., Kolubae-va Y.A. Formation of the structural and phase states in hardened castiron rollers. Part 1. *Steel in Translation*. 2010, vol. 40, no. 4, pp. 322–324.
37. Kosterev V.B., Efimov O.Y., Ivanov Y.F., Belov E.G., Gromov V.E. Formation of gradient structure-phase states in thermomechanical hardening. *Steel in Translation*. 2011, vol. 41, no. 4, pp. 283–286.
38. Efimov O.Yu., Ivanov Yu.F., Konovalov S.V., Gromov V.E. Gradient structural-phase states in the thermostrengthened low-carbon steel reinforcement. *Materials and manufacturing processes*. 2011, vol. 26, pp. 144–146.
39. Belov E.G., Efimov O.Y., Yur'ev A.B., Ivanov Y.F., Gromov V.E. Evolution of the structural-phase state of the surface of plasma-hardened rollers. *Steel in Translation*. 2011, vol. 41, no. 2, pp. 102–104.
40. Belov E.G., Poltoratskii L.M., Efimov O.Y., Konovalov S.V., Gromov V.E. Formation of structure and mechanical properties in the accelerated cooling of an H beam. *Steel in Translation*. 2010, vol. 40, no. 2, pp. 114–118.
41. Belov E.G., Kopylov I.V., Dikan' O.V., Gromov V.E. Production of DP155 I-beams for monorail tracks. *Steel in Translation*. 2010, vol. 40, no. 10, pp. 873–875.
42. Efimov O.Yu., Chinokalov V.Ya., Yur'ev A.B., Belov E.G., Gromov V.E. Structure-phase states and mechanical properties formation regularities at accelerated cooling of parallel flange beam. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2011, no. 4, pp. 16–19. (In Russ.).
43. Kosterev V.B., Efimov O.Yu., Ivanov Yu.F., Belov E.G., Gromov V.E. Formation regularities of gradient structure-phase states at strengthening by heat and mechanical treatment. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2011, no. 4, pp. 24–27. (In Russ.).
44. Sidorenko O.G., Fedorova I.P., Demchenko E.M., Klepikov A.G., Razdobreev V.G. Types of fractures of thermomechanical hardening of high-tensile reinforcement, subjected to hydrogen embrittlement. In: *Fundamental'nye i prikladnye problemy chernoi metallurgii* [Fundamental and applied issues of ferrous metallurgy]. Kiev: Naukova dumka, 1995, pp. 222–229. (In Russ.).
45. Sidorenko O.G. New technological solutions of the process of thermomechanical hardening of reinforcing steel. In: *Fundamental'nye i prikladnye problemy chernoi metallurgii. Vyp. 3* [Fundamental and applied issues of ferrous metallurgy. Issue 3]. Kiev: Naukova dumka, 1999, pp. 306–311. (In Russ.).
46. Uzlov I.G., Sidorenko O.G., Fedorova I.P., Sukhoi A.P., Kekukh A.V., Lyasov V.G., Mamaev A.V. New in the control technology of the process of thermal hardening of reinforcing bar. *Metal-lurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'*. 2008, no. 1, pp. 89–91. (In Russ.).
47. Bol'shakov V.I. *Istoriya razvitiya termicheskogo uprochneniya prokata: monografiya* [History of the development of thermal bar hardening: monography]. Dnepropetrovsk: PGASA, 2012, 388 p. (In Russ.).
48. Sarychev V.D., Voloshina M.S., Gromov V.E. Mathematical model of generation of thermoelastic waves at the influence of the concentrated power flow on the materials. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya*. 2011, vol. 8, no. 4, pp. 71–77. (In Russ.).

49. Morozov S.I., Pogorelov A.I., Demchenko E.M., Klepikov A.G., Sidorenko O.G., Krasovskaya G.M. Stabilization against corrosion cracking under tension of thermomechanically hardened reinforcing steel. *Stal'*. 1994, no. 6, pp. 66–69. (In Russ.).
 50. Sarychev V.D., Granovskii A.Yu., Nevskii S.A., Gromov V.E. Model of formation of droplets during electric arc surfacing of functional coatings. *AIP Conference Proceedings*. 2016, vol. 1698, no. 030013 (5 p).
 51. Lojkowski W., Millman Y., Chugunova S.I., Goncharova I.V., Djahanbakhsh M., Bürkle G., Fecht H.-J. The mechanical properties of the nanocrystalline layer on the surface of railway tracks. *Materials Science and Engineering: A*. 2003, vol. 303, no. 1–2, pp. 209–215.
 52. Ivanisenko Yu., Fecht H.J. Microstructure modification in the surface layers of railway rails and wheels: effect of high strain rate deformation. *Steel tech.* 2008, vol. 3, no. 1, pp. 19–23.
 53. Ivanisenko Yu., Lojkowski W., Valiev R.Z., Fecht H.-J. The mechanism of formation of nanostructure and dissolution of cementite in a pearlitic steel during high pressure torsion. *Acta Mater.* 2003, vol. 51, no. 18, pp. 5555–5570.
 54. Tarasov S.Yu., Rubtsov V.E. Shear instability in the subsurface layer of a material in friction. *Physics of the Solid State*. 2011, vol. 53, no. 2, pp. 358–362.
 55. Tarasov S., Rubtsov V., Kolubaev A. Subsurface shear instability and nanostructuring of metals in sliding. *Wear*. 2010, vol. 268, no. 1, pp. 59–66.
 56. Sarychev V.D., Nevskii S.A., Granovskii A.Yu., Gromov V.E. Mathematical model of nanostructure formation in rail steel under high intensive mechanical loading. *AIP Conf. Proc.* 2015, vol. 1683, no. 020200 (4 p).
 57. *Fizicheskie velichiny: Spravochnik* [Physical values: Reference book]. Grigor'ev I.S., Meilikhov E.Z. eds. Moscow: Energoatomizdat, 1991, 1232 p. (In Russ.).
 58. Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Peregodov O.A., Morozov K.V., Yur'ev A.B. Evolution of rail structure-phase states at continuous service. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2015, no. 4, pp. 262–266. (In Russ.).
 59. Gromov V.E., Peregodov O.A., Ivanov Yu.F., Morozov K.V., Alsaeva K.V. Evolution of structure and properties of a surface layer of rails at continuous service. *Voprosy materialovedeniya*. 2015, no. 3(83), pp. 30–37. (In Russ.).
- Acknowledgements.** The work was financially supported by the RFBR grants no. 15-08-03411 (section 2.1), no.16-48-420530 (section 2.3.), RNF no. 15-19-00065 (section 2.2), no. 15-12-00010 (section 2.4). Published in order of discussion.
- Information about the authors:**
- Sarychev V.D.,** *Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair of Physics named after V.M. Finkel* (sarychev_vd@mail.ru)
- V.E. Gromov,** *Dr. Sci. (Phys.-math.), Professor, Head of the Chair of Physics named after V.M. Finkel* (gromov@physics.sibsiu.ru)
- S.A. Nevskii,** *Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair of Physics named after V.M. Finkel* (nevskiy_sa@physics.sibsiu.ru)
- A.I. Nizovskii,** *Cand. Sci. (Chem.), Senior Researcher* (alexniz@inbox.ru)
- S.V. Konovalov,** *Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair of Physics named after V.M. Finkel* (konovalov@physics.sibsiu.ru)

Received April 5, 2016