Оригинальная статья

УДК 669.620.172.2

DOI: 10.57070/2304-4497-2023-1(43)-10-16

КОМБИНИРОВАННЫЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ НЕУСТОЙЧИВОСТИ И ИХ РОЛЬ В ОБРАЗОВАНИИ МИКРО- И НАНОСТРУКТУР МАТЕРИАЛОВ ПРИ ПЛАЗМЕННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

© 2023 г. С. А. Невский, В. Д. Сарычев, В. Е. Громов

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

Аннотация. Изучено формирование микро- и наноструктур в титановых сплавах, подвергнутых комбинированной обработке, которая включает воздействие гетерогенными плазменными потоками и последующую модификацию поверхностного слоя низкоэнергетическим сильноточным электронным пучком. Установлено, что основным механизмом образования структурно-фазовых состояний микро- и наноразмерного диапазонов при воздействии плазменных потоков, созданных электрическим взрывом проводников, является совместное проявление на границе раздела сред неустойчивостей Кельвина-Гельмгольца и Рэлея-Тейлора. Показано, что максимум скорости роста возмущений при ускорении второго слоя ($g = 5{\cdot}109$ м/с^2) и поперечной скорости 0 м/с приходится на длину волны (λ_m) 6,76 мкм. Если значение скорости второго слоя u_0 =10 м/с, то λ_m = 6,23 мкм, а при u_0 = 50 м/с – λ_m = 1,24 мкм. Механизмом образования микро- и наноструктур при последующей электронно-пучковой обработке является комбинированная термо-, испарительно-, концентрационно-капиллярная и термоэлектрическая неустойчивость. Показано, что, если не учитывать влияние градиента концентрации, термоэлектрических и испарительных эффектов, максимальное значение скорости роста будет наблюдаться при длине волны 113 мкм. Учет термоэлектрических явлений приводит к снижению значения λ_m до 48 мкм. Установлено, что при значении термоэлектрического коэффициента γ = 0,1 В/К максимум скорости роста наблюдается при λ_m = 0,3 мкм.

Ключевые слова: неустойчивость Кельвина-Гельмгольца, неустойчивость Рэлея-Тейлора, термокапиллярная неустойчивость, термоэлектрические явления

Финансирование: Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 22-79-10229).

Для цитирования: Невский С.А., Сарычев В.Д., Громов В.Е. Комбинированные гидродинамические неустойчивости и их роль в образовании микро- и наноструктур материалов при плазменных воздействиях // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2023. № 1 (43). С. 10–16. *http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-1(43)-10-16*

Original article

COMBINED HYDRODYNAMIC INSTABILITIES AND THEIR ROLE IN THE FORMATION OF MICRO- AND NANOSTRUCTURES OF MATERIALS UNDER PLASMA INFLUENCES

© 2023 S. A. Nevskii, V. D. Sarychev, V. E. Gromov

Siberian State Industrial University (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass, 654007, Russian Federation)

Abstract. The formation of micro- and nanostructures in titanium alloys subjected to combined treatment, including exposure to heterogeneous plasma flows and subsequent modification of the surface layer by a low-energy high-current electron beam, was studied. It is established that the main mechanism for the formation of structural-phase states of the micro and nanoscale range under the influence of plasma flows created by an electric explosion of conductors is the joint manifestation of Kelvin-Helmholtz and Rayleigh-Taylor instabilities at the interface of the media. It is shown that the maximum growth rate of disturbances with acceleration of the second layer $g = 5 \times 10^9$ m/s^2 and a transverse velocity of 0 m/s falls on the wavelength $\lambda_m = 6.76$ μm. If the velocity value of the second layer is $u_0 = 10$ m/s, then $\lambda_m = 6.23$ μm, and at $u_0 = 50$ m/s – $\lambda_m = 1.24$ μm. The mechanism of formation of micro- and nanostructures during subsequent electron beam processing is a combined thermo-evaporative, concentration-capillary and thermoelectric instability. It is shown that if the influence of the concentration gradient, thermoelectric and evaporative effects is not taken into account, the maximum value of the growth rate will be observed at a wavelength of 113 μm. Taking into account thermoelectric phenomenon leads to a decrease in the value of λ_m to 48 μm. It is established that at the value of the thermoelectric coefficient $\gamma = 0.1$ V/K, the maximum growth rate is observed at $\lambda_m = 300$ nm.

Key words: Kelvin-Helmholtz instability, Rayleigh-Taylor instability, thermocapillary instability, thermoelectric phenomena

For citation: Nevskii S.A., Sarychev V.D., Gromov V.E. Combined hydrodynamic instabilities and their role in the formation of micro- and nanostructures of materials under plasma influences. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2023, no. 1 (43), pp. 10–16. (In Russ.). *http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-1(43)-10-16*

Введение

Одной из фундаментальных проблем физики конденсированного состояния является теоретическое исследование влияния концентрированных потоков энергии на структуру, фазовый состав и свойства поверхностных слоев металлических материалов [1, 2]. Это обусловлено тем, что в поверхностных слоях условия для зарождения дефектов кристаллической решетки, которые приводят к износу и коррозии изделий ответственного назначения, более благоприятные, чем в объеме материала [3]. Для того, чтобы избежать преждевременного выхода из строя изделий, необходимы поиск новых и усовершенствование существующих методов защиты их поверхности [4, 5]. К их числу относятся концентрированные потоки энергии (электронно-пучковая обработка [6, 7], электровзрывное легирование и напыление [8, 9], лазерная обработка [10] и т.п.), которые способствуют формированию на поверхности обрабатываемого изделия микро- и наноструктурных состояний, обеспечивающих его высокую прочность и износостойкость за относительно короткое время воздействия. Однако широкому внедрению данных методов защиты в практику препятствует отсутствие детальных сведений о закономерностях и механизмах формирования микро- и наноструктур при таких воздействиях. Решение этой проблемы позволит получать материалы с заданной структурой и хорошими свойствами. Особую роль в формировании микро- и наноструктур играют внешние и внутренние межфазные границы. На них возникают и развиваются, в зависимости от внешних условий, различного рода неустойчивости, которые приводят к самопроизвольному переходу обрабатываемого материала в состояние с микро- и наноструктурой [11, 12].

Целью настоящей работы является поиск механизмов и создание математических моделей формирования градиентных микро- и наноструктурных состояний металлических материалов при воздействии концентрированных потоков энергии на основе комбинированных сдвиговых неустойчивостей на границах раздела сред.

Модель образования микро- и наноструктур в титане при воздействии гетерогенных плазменных потоков

Рассмотрим воздействие гетерогенных плазменных потоков на поверхность металлических материалов на примере системы Ti – Y. Как показывают результаты работ [13, 14], основным механизмом формирования наноструктур в поверхностных слоях материалов являются неустойчивости Кельвина-Гельмгольца и Рэлея-Тейлора. Для изучения начальной стадии этих неустойчивостей рассмотрим устойчивость плоского стационарного течения двухслойной несжимаемой жидкости. Направление оси x выбрано вдоль границы раздела между слоями, а ось y – перпендикулярна оси x и направлена в сторону второго слоя. Первый слой ($-\infty < x < \infty$, $-h < x < a\ (x,t)$ (где a – смещение поверхности раздела; h – толщина нижнего слоя)) занимает вязкая неподвижная жидкость с вязкостью η_1 и плотностью ρ_1. Второй слой ($-\infty < x < \infty$, $a\ (x,t) < x < H$ (где H – толщина верхнего слоя)) занимает жидкость с вязкостью η_2 и плотностью ρ_2, которая движется с постоянной скоростью u_0, направленной вдоль оси x. Ускорение g направлено в сторону, противоположную оси y. Для каждого слоя записаны линеаризованные уравнения Навье-Стокса, а на их границах заданы кинематические и динамические граничные

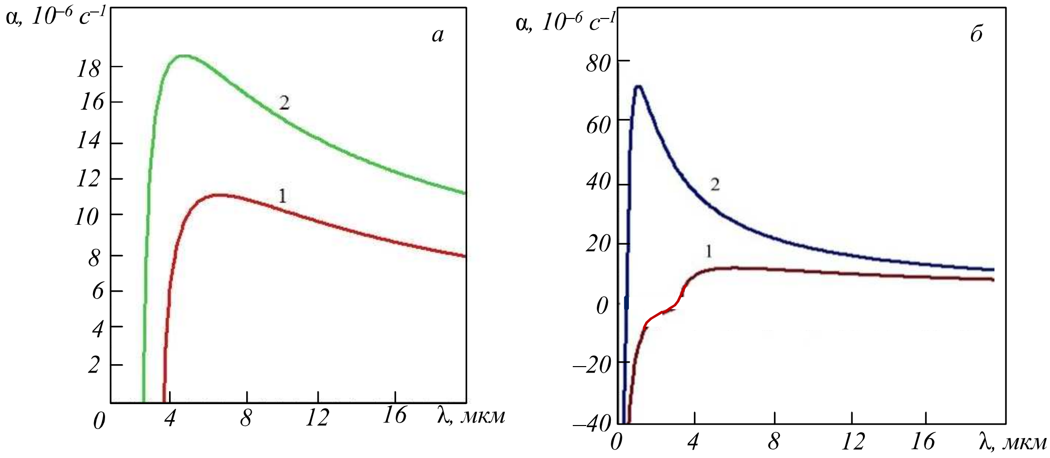

Рис. 1. Зависимости скорости роста возмущений поверхности раздела от длины волны при различных значениях скорости и ускорения второго слоя:
а – u_0 = 0 м/с (*1* – $g = 5·10^9$ м/с^2; *2* – $g = 10^{10}$ м/с^2); *б* – $g = 5·10^9$ м/с^2 (*1* – u_0 = 10 м/с; *2* – u_0 = 50 м/с)

Fig. 1. Dependences of the growth rate of interface disturbances on the wavelength at different values of the velocity and acceleration of the second layer:
a – u_0 = 0 m/s (*1* – $g = 5·10^9$ m/s^2; *2* – $g = 10^{10}$ m/s$_2$); *б* – $g = 5·10^9$ m/s^2 (*1* – u_0 = 10 m/s; *2* – u_0 = 50 m/s)

условия [15,16]. Применяется так называемое вязко-потенциальное приближение, согласно которому эффекты, связанные с вязкостью, наблюдаются вблизи границы раздела сред [17, 18]. Поиск решения уравнений модели в виде бегущей гармонической волны приводит к следующему дисперсионному уравнению:

$$\omega^2 + 2\omega(a - ib) + c - ic_1 = 0;$$
$$a = \frac{1}{(1+\mu)R_1}\Big((\eta_1 \coth(kh) + \eta_2 \coth(kH))k^2\Big);$$
$$b = \frac{\mu k u_0}{1+\mu};\quad \mathrm{c} = \frac{\omega_0^2 - \mathrm{k}^2 \mathrm{u}_0^2 \mu}{1+\mu}; \qquad (1)$$
$$c_1 = \frac{2u_0 k^3 \eta_2 \coth(kH)}{(1+\mu)R_1},$$

где $\omega = \alpha + i\Omega$ – комплексная циклическая частота; $\omega_0^2 = \dfrac{\sigma_0 k^3 + (\rho_1 - \rho_2)gk}{R_1}$; $\mu = \dfrac{R_2}{R_1}$; k – волновое число; $R_1 = \rho_1 \coth(kh)$; $R_2 = \rho_2 \coth(kH)$; σ_0 – межфазное поверхностное натяжение; g – ускорение одного из слоев.

Зависимость скорости роста возмущений поверхности раздела от длины волны имеет вид:

$$\alpha = \left(\sqrt{\frac{(\delta + \sqrt{\delta^2 + 4\delta_1^2})ab}{2}} - a\right), \qquad (2)$$

где $\delta = (a^2 - b^2 - c)/(ab)$, $\delta_1 = 1 - (c_1/2ab)$.

На рис. 1, *а* приведены зависимости скорости роста возмущений от длины волны возмущений границы раздела покрытие – подложка при различных значениях ускорения второго слоя на примере системы Ti – Y. При проведении расчетов предполагалось, что амплитуда возмущений много меньше толщины слоев. В этом случае $\coth(kh) = \coth(kH) = 1$. Максимум скорости роста при $g = 5·10^9$ м/с^2 приходится на длину волны (λ_m) 6,76 мкм (рис. 1, *а*, кривая *1*). В свою очередь увеличение ускорения до 10^{10} м/с^2 приводит к уменьшению значения λ_m до 4,81 мкм (рис. 1, *а*, кривая *2*). Учет влияния поперечной скорости второго слоя приводит к уменьшению значений λ_m до 6,23 мкм при u_0 = 10 м/с и 1,24 мкм при u_0 = 50 м/с соответственно (рис. 1, *б*).

Модель образования микро- и наноструктур в титане, легированном иттрием, при воздействии электронных пучков субмиллисекундной длительности

Проведено теоретическое исследование формирования поверхностных микро- и наноструктур в титане, легированном иттрием, при воздействии электронных пучков. В основу модели были положены представления о гидродинамической природе образования данных структур по механизму комбинированной термо-, концентрационно-, испарительно-капиллярной и термоэлектрической неустойчивости. Путем анализа дисперсионных уравнений изучена начальная стадия данной неустойчивости, в которой возникают малые возмущения на поверхности расплава. Для расплавленного слоя запишем линеаризованные уравнения Навье-Стокса, а на их границах зададим кинематические и динамические граничные условия с учетом термоэлектрических эффектов. Дисперсионное уравнение имеет вид [19]:

$$
\begin{aligned}
&R_T - R_E - R_V - R_\sigma = 0;\\
&R_\sigma = \omega^2((\omega + 2\omega_\nu)^2 + \omega_c^2) - \frac{4\omega^2\omega_\nu^2 k_1}{k};\\
&R_T = \omega_T\omega_\nu\left(\delta\left(1 - \frac{k_1}{k_2}\right)(2\omega\omega_\nu + \omega^2 + \omega_c^2) + \left(1 - \frac{k}{k_2}\right)\left(\frac{2k_1\omega\omega_\nu}{k} + \omega_c^2\right)\right);\\
&R_E = -\omega_E\omega_\nu\omega\left(\left(1 - \frac{k_1}{k}\right)\omega_\nu + \omega\right);\\
&R_V = \omega_p\omega_\nu\begin{pmatrix}\left(\delta\left(1 - \frac{k_1}{k_2}\right) + \left(1 - \frac{k}{k_2}\right)\right)\omega_E\omega_\nu + \\ +2\delta\omega\omega_\nu\left(1 - \frac{k_1}{k_2}\right) + \\ +(2\omega_\nu + \omega)\omega\left(1 - \frac{k}{k_2}\right)\end{pmatrix},
\end{aligned}
\tag{3}
$$

где $\omega_T = \frac{\sigma_T G_0}{\rho\nu}$; $\omega_\nu = \nu k^2$; $\omega_c^2 = \frac{\sigma_0 k^3}{\rho} - \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E_0^2}{\rho}k^2$; $\omega_p = \frac{p'_\nu G_0}{\rho\nu k}$; $\omega_E = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E_0^2}{\rho\nu}$; $\delta = \frac{\Pr}{1 - \Pr}$; $\Pr = \frac{\nu}{\chi}$ – число Прандтля; p'_ν – температурный коэффициент испарительного давления; σ_0 – поверхностное натяжение при температуре плавления; σ_T – температурный коэффициент поверхностного натяжения; E_0 – напряженность термоэлектрического поля; G_0 – градиент невозмущенной температуры; ε – диэлектрическая проницаемость; ε_0 – электрическая постоянная; χ – температуропроводность; ν – кинематическая вязкость.

Для жидких металлов Pr << 1. С учетом этого факта зависимость (3) примет вид [20]:

$$
\begin{aligned}
&\frac{\omega_T \Pr}{2}(2\omega\omega_\nu + \omega_c^2)\left(\omega + 2\omega_\nu\left(1 - \frac{k_1}{k}\right)\right) + \\
&+\frac{\omega_p \Pr}{2}\left[\omega_E\omega_\nu\left(\omega + 2\omega_\nu\left(1 - \frac{k_1}{k}\right)\right) + \right.\\
&\left.+\omega\left(\omega^2 + 2\omega\omega_\nu + 4\omega_\nu^2\left(1 - \frac{k_1}{k}\right)\right)\right] - \\
&-\omega_E\omega_\nu\omega\left(\left(1 - \frac{k_1}{k}\right)\omega_\nu + \omega\right) - \omega^2\left((\omega + 2\omega_\nu)^2 + \omega_c^2\right) + \\
&+\frac{4\omega^2\omega_\nu^2 k_1}{k} = 0.
\end{aligned}
\tag{4}
$$

Для того, чтобы учесть влияние концентрации иттрия, в уравнении (4) необходимо заменить произведение $\omega_T \Pr$ на $\omega_T \Pr + \omega_c \mathrm{Sc}$ (где $\mathrm{Sc} = \nu/D$ – число Шмидта; D – коэффициент диффузии; $\omega_C = \frac{\sigma_C G_1}{\rho\nu}$; G_1 – градиент концентрации; σ_c – концентрационный коэффициент поверхностного натяжения).

Применение низкочастотного приближения оправдано лишь в том случае, если Pr << 1 и Sc << 1. Для жидких металлов число Шмидта принимает значения ~10. Эти оценки сделаны в предположении неподвижной жидкости. В действительности конвективное течение усиливает процессы массопереноса, поэтому значения коэффициента диффузии будем считать на порядок большим, чем коэффициент кинематической вязкости.

Из полученного дисперсионного уравнения находили зависимости скорости роста возмущений поверхности расплава (рис. 2). Если не учитывать влияния градиента концентрации, термоэлектрических и испарительных эффектов, максимальное значение скорости роста будет наблюдаться при длине волны 113 мкм (рис. 2, *а*, кривая *1*). При значениях напряженности термоэлектрического поля 10^5 – 10^6 В/м (рис. 2, *а*, кривая *2*) максимальное значение скорости роста наблюдается при λ_m = 50 мкм. Учет процессов испарения вещества приводит к увеличению λ_m до 92 мкм при давлении отдачи паров $2 \cdot 10^5$ Па (рис. 2, *а*, кривая *3*). Термоэлектрический эффект в этом случае не оказывает никакого влияния на неустойчивость поверхности раздела (рис. 2, *а*, кривая *4*). Влияние градиента концентрации иттрия проявляется в уменьшении значения λ_m до 74 мкм при отсутствии термоэлектрических эффектов и эффектов испарения (рис. 2, *б*, кривая *1*). При учете термоэлектрических эффектов максимум скорости роста приходится на длину волны 48 мкм (рис. 2, *б*, кривая *2*). При испарительном давлении $2 \cdot 10^5$ Па значение λ_m составляет 36 мкм, термоэлектрические эффекты приводят лишь к незначительному увеличению максимальной скорости роста возмущений (рис. 2, *б*, кривые *3* и *4*).

Полученные результаты дают адекватное объяснение образованию поверхностно-периодических структур микрометрового диапазона. Образование ячеистых структур субмикро- и наноразмерного диапазонов в рамках низкочастотного приближения, также как и в случае, рассмотренном выше, возможно при термоэлектрическом коэффициенте (γ), равном 0,1 В/К, что соответствует напряженности (E_0) электрического поля ~ 10^6 – 10^7 В/м (рис. 3). Для титановых сплавов λ_{cr} = 0,17 мкм и λ_m = 0,3 мкм.

Выводы

Предложен механизм образования микро- и наноструктур в титановых сплавах при воздействии гетерогенных плазменных потоков, созданных электрическим взрывом порошка иттрия. Он заключается в возникновении на поверхности раздела покрытия и подложки комби-

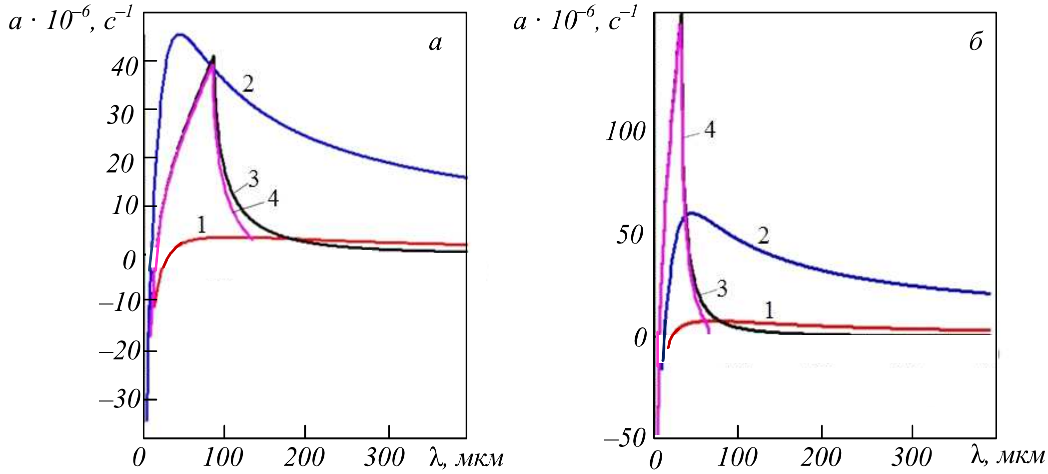

Рис. 2. Зависимости скорости роста возмущений поверхности расплава от длины волны системы Ti – Y без учета влияния градиента концентрации иттрия (*а*) и с учетом влияния градиента концентрации иттрия (*б*):
1 – без учета термоэлектрических и испарительно-капиллярных явлений; *2* – с учетом только термоэлектрических явлений; *3* – при наличии термо- и испарительно-капиллярной неустойчивости; *4* – при наличии термо-, испарительно-капиллярной неустойчивости и термоэлектрических явлений

Fig. 2. Dependences of the growth rate of the melt surface disturbances on the wavelength of the Ti – Y system without taking into account the influence of the yttrium concentration gradient (*a*) and taking into account the influence of the yttrium concentration gradient (*б*):
1 – without taking into account thermoelectric and evaporative-capillary phenomena; *2* – taking into account only thermoelectric phenomena; *3* – in the presence of thermo- and evaporative-capillary instability; *4* – in the presence of thermo-, evaporative-capillary instability and thermoelectric phenomena

нированной неустойчивости Кельвина-Гельмгольца-Рэлея-Тейлора. Определены условия, при которых данная неустойчивость возникает в микро- и нанодиапазонах.

Установлено, что образование поверхностных микро- и наноструктур при воздействии низкоэнергетических сильноточных электронных пучков обусловлено возникновением комбинированной термо-, концентрационно-, испарительно-капиллярной и термоэлектрической неустойчивости. При значении термоэлектрического коэффициента ~ 10^{-1} – 1 В/К максимум скорости роста приходится на длины волн субмикро- и нанометрового диапазонов. Это совпадает с экспериментальными данными по размерам структур ячеистой кристаллизации.

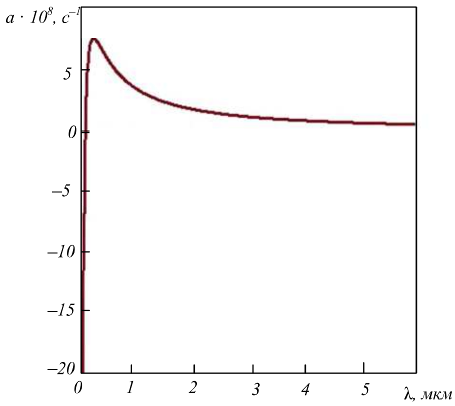

Рис. 3. Зависимость скорости роста возмущений поверхности раздела плазма – расплав при значении термоэлектрической постоянной 10^{-1} В/К

Fig. 3. Dependence of the growth rate of disturbances of the plasma – melt interface at the value of the thermoelectric constant 10^{-1} V/K

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gao B., Hu L., Li S., Y.Hao, Y. Zhang, Tu G. Study on the nanostructure formation mechanism of hypereutectic Al–17.5 Si alloy induced by high current pulsed electron beam // Applied Surface Science. 2015. Vol. 346. P. 147–157.
2. Lyu P., Peng T., Miao Y., Liu Z., Qi Gao, Zhang C., Jin Y., Guan Q., Cai J. Microstructure and properties of CoCrFeNiMo0.2 high-entropy alloy enhanced by high-current pulsed electron beam // Surf. & Coat. Tech. 2021. Vol. 410. Article 126911. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.126911
3. Cherenda N.N., Basalai A.V., Shymanski V.I. et al. Modification of Ti-6Al-4V alloy element и phase composition by compression plasma flows impact // Surface и Coatings Technology. 2018. Vol. 355. P. 148–154.
4. Javadi A., Solouk A., Haghbin Nazarpak M., Bagheri F. Surface engineering of titanium-based implants using electrospraying and dip coating methods // Materials Science and Engineering C. 2019. Vol. 99. P. 620–630.
5. Shulov V.A., Gromov A.N., Teryaev D.A., Engel'ko V.I. Application of high-current pulsed electron beams for modifying the surface of gas-turbine engine blades // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. 2016. Vol. 57. P. 256–265.
6. Fetzer R., Mueller G., An W., Weisenburger A. Metal surface layers after pulsed electron beam

treatment // Surface and Coatings Technology. 2014. Vol. 258. P. 549–556.

7. Lu D., Gao B., Zhu G., Lv Jike, Hu L. High-current pulsed electron treatment of hypoeutectic Al–10Si alloy // High Temperature Materials and Processes. 2017. Vol. 36. P. 97–100.
8. Panin V.E., Gromov V.E., Romanov D.A., Budovskikh E.A., Panin S.V. The physical basics of structure formation in electroexplosive coatings // Doklady Physics. 2017. Vol. 62. P. 67–70.
9. Romanov D.A., Gromov V.E., Glezer A.M., Panin S.V., Semin A.P. Structure of electro-explosion resistant coatings consisting of immiscible components // Materials Letters. 2017. Vol. 125. P. 25–28.
10. Papadopoulos A., Skoulas E., Tsibidis G. D., Stratakis E. Formation of periodic surface structures on dielectrics after irradiation with laser beams of spatially variant polarisation: a comparative study // Applied Physics A: Materials Science and Processing. 2018. Vol. 124. Article 146. *https://doi.org/10.1007/s00339-018-1573-x*
11. Хакен Г. Синергетика. Москва: Мир, 1990. 405 с.
12. Khachaturyan A.G. Theory of Structural Transformations in Solids. New York: Wiley, 1983. 574 p.
13. Nevskii S., Sarychev V., Konovalov S., Granovskii A., Gromov V. Wave instability on the interface coating/substrate material under heterogeneous plasma flows // Journal of Materials Research and Technology. 2020. Vol. 9 (1). P. 539–550.
14. Математические модели формирования градиентных структур в материалах при воздействии концентрированных потоков энергии / В.Д. Сарычев, С.А. Невский, А.Ю. Грановский, В.Е. Громов. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2019. 120 с.
15. Shumlak U., Roderick N.F. Mitigation of the Rayleigh-Taylor instability by sheared axial flows // Phys. Plasmas. 1998. Vol. 5. P. 2384–2389.
16. Olson B.J., Larsson J., Lele S.K., Cook A.W. Nonlinear effects in the combined Rayleigh-Taylor/Kelvin-Helmholtz instability // Physics of Fluids. 2011. Vol. 23. Article 114107.
17. Awasthi M.K. Effect of viscous pressure on Kelvin-Helmholtz instability through porous media // Journal of Porous Media. 2016. Vol. 19 (3). P. 205–218.
18. Joseph D.D., Funada T., Wang J. Potential flows of viscous and viscoelastic fluids. Cambridge: Cambridge Univ Press, 2007. 497 p.
19. Nevskii S., Sarychev V., Konovalov S., Granovskii A., Gromov V. Formation mechanism of micro- and nanocrystalline surface layers in titanium and aluminum alloys in electron beam irradiation // Metals. 2020. Vol. 10. No. 10. Article 1399.
20. Levchenko E.B., Chernyakov A.L. Instability of capillary waves in an inhomogeneously heated liquid under the influence of laser radiation // Fizika I Khimiya Obrabotki Materialov. 1983. No. 1. P. 129–141.

REFERENCES

1. Gao B., Hu L., Li S., Y.Hao, Y. Zhang, Tu G. Study on the nanostructure formation mechanism of hypereutectic Al–17.5 Si alloy induced by high current pulsed electron beam. *Applied Surface Science*. 2015, vol. 346, pp. 147–157.
2. Lyu P., Peng T., Miao Y., Liu Z., Qi Gao, Zhang C., Jin Y., Guan Q., Cai J. Microstructure and properties of CoCrFeNiMo0.2 high-entropy alloy enhanced by high-current pulsed electron beam. *Surf. & Coat. Tech.* 2021, vol. 410, article 126911. *https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.126911*
3. Cherenda N.N., Basalai A.V., Shymanski V.I. et al. Modification of Ti-6Al-4V alloy element и phase composition by compression plasma flows impact. *Surface and Coatings Technology*. 2018, vol. 355, pp. 148–154.
4. Javadi A., Solouk A., Haghbin Nazarpak M., Bagheri F. Surface engineering of titanium-based implants using electrospraying and dip coating methods. *Materials Science and Engineering C.* 2019, vol. 99, pp. 620–630.
5. Shulov V.A., Gromov A.N., Teryaev D.A., Engel'ko V.I. Application of high-current pulsed electron beams for modifying the surface of gas-turbine engine blades. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. 2016, vol. 57, pp. 256–265.
6. Fetzer R., Mueller G., An W., Weisenburger A. Metal surface layers after pulsed electron beam treatment. *Surface and Coatings Technology.* 2014, vol. 258, pp. 549–556.
7. Lu D., Gao B., Zhu G., Lv J., Hu L. High-current pulsed electron treatment of hypoeutectic Al–10Si alloy. *High Temperature Materials and Processes.* 2017, vol. 36, pp. 97–100.
8. Panin V.E., Gromov V.E., Romanov D.A., Budovskikh E.A., Panin S.V. The physical basics of structure formation in electroexplosive coatings. *Doklady Physics*. 2017, vol. 62, pp. 67–70.
9. Romanov D.A., Gromov V.E., Glezer A.M., Panin S.V., Semin A.P. Structure of electro-

explosion resistant coatings consisting of immiscible components. *Materials Letters*. 2017, vol. 125, pp. 25 – 28.

10. Papadopoulos A., Skoulas E., Tsibidis G. D., Stratakis E. Formation of periodic surface structures on dielectrics after irradiation with laser beams of spatially variant polarisation: a comparative study. *Applied Physics A: Materials Science and Processing*. 2018, vol. 124, article 146. *https://doi.org/10.1007/s00339-018-1573-x*

11. Khaken G. S*ynergetics*. Moscow: Mir, 1990, 405 p. (In Russ.).

12. Khachaturyan A. G. *Theory of Structural Transformations in Solids*. New York: Wiley, 1983. 574 p.

13. Nevskii S., Sarychev V., Konovalov S., Granovskii A., Gromov V. Wave instability on the interface coating/substrate material under heterogeneous plasma flows. *Journal of Materials Research and Technology*. 2020, vol. 9 (1), pp. 539–550.

14. Sarychev V.D., Nevskii S.A., Granovskii A.Yu., Gromov V.E. *Mathematical models of the formation of gradient structures in materials under the influence of concentrated energy flows*. Novosibirsk: Publishing House of SB RAS, 2019, 120 p. (In Russ.).

15. Shumlak U., Roderick N.F. Mitigation of the Rayleigh-Taylor instability by sheared axial flows. *Phys. Plasmas*. 1998, vol. 5, pp. 2384–2389.

16. Olson B.J., Larsson J., Lele S.K., Cook A.W. Nonlinear effects in the combined Rayleigh-Taylor/Kelvin-Helmholtz instability. *Physics of Fluids*. 2011, vol. 23, article 114107.

17. Awasthi M.K. Effect of viscous pressure on Kelvin-Helmholtz instability through porous media. *Journal of Porous Media*. 2016, vol. 19 (3), pp. 205–218.

18. Joseph D.D., Funada T., Wang J. *Potential flows of viscous and viscoelastic fluids*. Cambridge: Cambridge Univ Press, 2007. 497 p.

19. Nevskii S., Sarychev V., Konovalov S., Granovskii A., Gromov V. Formation mechanism of micro- and nanocrystalline surface layers in titanium and aluminum alloys in electron beam irradiation. *Metals*. 2020, vol. 10, no. 10, article 1399.

20. Levchenko E.B., Chernyakov A.L. Instability of capillary waves in an inhomogeneously heated liquid under the influence of laser radiation. *Fizika I Khimiya Obrabotki Materialov*. 1983, no. 1, pp. 129–141. (In Russ.).

Сведения об авторах

Сергей Андреевич Невский, *д.т.н., доцент, доцент кафедры естественнонаучных дисциплин имени профессора В.М. Финкеля,* Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: nevskiy.sergei@yandex.ru
ORCID: 0000-0001-7032-9029

Владимир Дмитриевич Сарычев*, к.т.н., доцент кафедры естественнонаучных дисциплин имени профессора В.М. Финкеля,* Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail*:* sarychev_vd@mail.ru
ORCID: 0000-0002-4861-0778

Виктор Евгеньевич Громов*, д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой естественнонаучных дисциплин им. профессора В.М. Финкеля,* Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail*:* gromov@physics.sibsiu.ru
ORCID: 0000-0002-5147-5343

Information about the authors

Sergey A. Nevskii, *Dr. Sci.* (Eng.), Assist. Prof. of *the Chair of of Natural Sciences named after Professor V.M. Finkel,* Siberian State Industrial University
E-mail: nevskiy.sergei@yandex.ru
ORCID: 0000-0001-7032-9029

Vladimir D. Sarychev, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of *the Chair of of Natural Sciences named after Professor V.M. Finkel,* Siberian State Industrial University
E-mail*:* sarychev_vd@mail.ru
ORCID: 0000-0002-4861-0778

Viktor E. Gromov, *Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Head of the Chair of Science named after V.M. Finkel'*, Siberian State Industrial University
ORCID*:* 0000-0002-5147-5343
E-mail*:* gromov@physics.sibsiu.ru

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Поступила в редакцию 05.09.2022
После доработки 17.10.2022
Принята к публикации 17.10.2022

Received 05.09.2022
Revised 17.10.2022
Accepted 17.10.2022