

Научная статья

1.3.8. Физика конденсированного состояния (физико-математические науки)

УДК 669.112:539.4:669.539.382

doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2022.03.005

МЕХАНИЗМ ФОРМИРОВАНИЯ ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА «ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОЕ ПОКРЫТИЕ/ПОДЛОЖКА» ПРИ ХОЛОДНОМ ПЕРЕНОСЕ МЕТАЛЛА**Сергей Андреевич Невский^{1†}, Владимир Дмитриевич Сарычев²,
Сергей Валерьевич Коновалов³, Юрий Федорович Иванов⁴,
Кирилл Александрович Осинцев⁵, Виктор Евгеньевич Громов⁶**^{1, 2, 3, 6} Сибирский государственный индустриальный университет, ул. Кирова, 42, 654007, Новокузнецк, Россия⁴ Институт сильноточной электроники СО РАН, пр. Академический 2/3, 634055, Томск, Россия⁵ Самарский Национальный исследовательский университет им. С.П. Королёва, Московское шоссе, 34, 443086, Самара, Россия¹ nevskiy.sergei@yandex.ru[†], <https://orcid.org/0000-0001-7032-9029>² sarychev_vd@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4861-0778>³ konovalov@physics.sibsiu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4809-8660>⁴ yufi55@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8022-7958>⁵ kirilloss@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1150-6747>⁶ gromov@physics.sibsiu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5147-5343>

Аннотация. Изучено формирование рельефа поверхности раздела «высокоэнтропийное покрытие/подложка» при холодном переносе металла с позиций представлений о возникновении на границе раздела гидродинамических неустойчивостей Кельвина-Гельмгольца и Рэлея-Тейлора. Показано, что наличие только неустойчивости Кельвина-Гельмгольца не дает адекватного объяснения формирования волнообразного рельефа поверхности «высокоэнтропийное покрытие/подложка». Учет ускорения слоя (неустойчивости Рэлея-Тейлора), занимаемого покрытием из сплава Co-Cr-Fe-Mn-Ni, качественно изменяет картину взаимного перемешивания материалов. При значении поперечной скорости слоя 50 м/с и вертикальной составляющей ускорения 10^7 м/с². Формирование вихрей начинается при $t > 4$ мкс, а их распад на капли происходит в интервале от 8,4 мкс до 22,5 мкс. При $t > 22,5$ мкс начинается процесс интенсивного перемешивания. При отличной от нуля горизонтальной составляющей ускорения слоев ($a_y/a_x \sim 0,5$) фрагментация вихрей будет происходить в интервале от 16,5 мкс до 23 мкс, а интенсивное перемешивание вещества слоев начинается при $t > 23$ мкс. Показано, что в этих условиях расчётная конфигурация границы раздела «покрытие/подложка» совпадает с наблюдаемой в эксперименте. Размеры образовавшихся частиц составляют от 57 до 127 мкм, что приближенно соответствует экспериментальным данным.

Ключевые слова: высокоэнтропийные сплавы, неустойчивость Кельвина-Гельмгольца, неустойчивость Рэлея-Тейлора, уравнения Навье-Стокса.

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ (проект № 20-19-00452).

Для цитирования: Невский С.А., Сарычев В.Д., Коновалов С.В., Иванов Ю.Ф., Осинцев К.А., Громов В.Е. Механизм формирования границы раздела «высокоэнтропийное покрытие/подложка» при холодном переносе металла // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2022. Т. 19, № 3. С. 326–334. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2022.03.005.

Original article

MECHANISM OF FORMATION OF THE «HIGH-ENTROPY COATING/SUBSTRATE» INTERFACE DURING COLD METAL TRANSFER

Sergey A. Nevskii^{1†}, Vladimir D. Sarychev², Sergey V. Konovalov³, Yurii F. Ivanov⁴,
Kirill A. Osintsev⁵, Victor E. Gromov⁶

^{1, 2, 3, 6} Siberian State Industrial University, Kirov Str., 42, Novokuznetsk, 654007, Russia

⁴ Institute of High Current Electronics SB RAS, Academicheskii Pr., 2/3, Tomsk, 634055, Russia

⁵ Samara National Research University, Moskovskoe shosse, 34, 443086, Samara, Russia

¹ nevskiy.sergei@yandex.ru[†], <https://orcid.org/0000-0001-7032-9029>

² sarychev_vd@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4861-0778>

³ konovalov@physics.sibsiu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4809-8660>

⁴ yufi55@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8022-7958>

⁵ kirilloss@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1150-6747>

⁶ gromov@physics.sibsiu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5147-5343>

Abstract. The formation of the relief of the «high-entropy coating/substrate» interface surface during cold metal transfer is studied from the standpoint of ideas about the occurrence of Kelvin-Helmholtz and Rayleigh-Taylor hydrodynamic instabilities at the interface. It is shown that the presence of only the Kelvin-Helmholtz instability does not provide an adequate explanation for the formation of the wave-like relief of the «high-entropy coating/substrate» surface. Taking into account the acceleration of the layer (Rayleigh-Taylor instability) occupied by the coating of the Co-Cr-Fe-Mn-Ni alloy qualitatively changes the picture of mutual mixing of materials. When the transverse velocity of the layer is 50 m/s and the vertical component of acceleration is 107 m/s². The formation of vortices begins at $t > 4$ microseconds, and their decay into droplets occurs in the range from 8.4 microseconds to 22.5 microseconds. At $t > 22.5$ microseconds, the process of intensive mixing begins. With a non-zero horizontal component of the acceleration of the layers ($a_y/a_x \sim 0.5$), the fragmentation of vortices will occur in the range from 16.5 microseconds to 23 microseconds, and intensive mixing of the substance of the layers begins at $t > 23$ microseconds. It is shown that under these conditions, the calculated configuration of the upper room of the «coating/substrate» section coincides with the one observed in the experiment. The sizes of the formed particles range from 57 to 127 microns, which approximately corresponds to experimental data.

Keywords: high-entropy alloys, Kelvin-Helmholtz instability, Rayleigh-Taylor instability, Navier-Stokes equations.

Acknowledgements: The research was financially supported by the grant Russian Scientific Foundation (No. 20-19-00452).

For citation: Nevskii, S. A., Sarychev, V. D., Konovalov, S. V., Ivanov, Yu. F., Osintsev, K. A. & Gromov, V. E. (2022). The mechanism of formation of the interface «high-entropy coating/substrate» during cold metal transfer. *Fundamental'nye problemy sovremennoy materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 3(19), 326–334. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2022.03.005.

Введение

Высокоэнтропийные сплавы находят все большее применение в качестве защитных покрытий, так как обладают высокими механическими и трибологическими свойствами [1-3]. В настоящее время одним из способов нанесения таких покрытий является холодный перенос металла, который позволяет многократно увеличивать сроки службы деталей ответственного назначения [4, 5]. Взаимодействие наплавляемого материала с подложкой при данном виде воздействия носит сложный и многофакторный характер. Оно включает в себя нагрев и расплавление подложки, конвективные течения в расплавленном слое, растворение легирующих

элементов, кристаллизация с последующим образованием ячеистой и дендритной структуры и т.д. [6]. Также следует отметить, что при холодном переносе металла, температура сварочной ванны значительно ниже, чем при электродуговой наплавке, поэтому перемешивание основного и электродного металла происходит менее интенсивно.

В настоящей работе особое внимание будет уделено конвективным течениям на границе расплавленных слоев, так как от их протекания будет зависеть качество рельефа поверхности раздела «покрытие/подложка». При отличной от нуля поперечной скорости движения электрода в расплавленном слое помимо термокапиллярной и термогравитационной конвекции

немаловажную роль играют неустойчивости Кельвина-Гельмгольца и Рэлея-Тейлора, именно они отвечают за формирование рельефа поверхности раздела «покрытие/подложка» [7]. От формы этого рельефа зависит адгезионная прочность покрытий. Результаты исследований [8, 9] показывают, что сложный профиль поверхности раздела способствует диспергированию концентраторов напряжений, при этом расстояние между элементами рельефа («зубцами», «иглами» и т.п.) должно принимать значения в микро и нанодиапазоне. Это позволяет сохранять функциональные свойства покрытия без формирования протяженных полос локализованной пластичности в материале подложки. Для обеспечения такого рельефа необходима информация о параметрах внешнего воздействия и характеристиках материала, при которых реализуется неустойчивость Кельвина-Гельмгольца и Рэлея-Тейлора в микро и нанодиапазоне. В этой связи целью настоящей работы является изучение формирования рельефа поверхности «покрытие/подложка» при электродуговой наплавке и поиск параметров внешнего воздействия, в которых реализуются данные неустойчивости.

Материал и методика исследования

Исследовали взаимодействие высокоэнтропийного расплава Co-Cr-Fe-Mn-Ni и подложки из алюминиевого сплава АМг5. Режим нанесения покрытия: скорость подачи проволоки 13 м/мин, сила тока ~100 А, напряжение 22 В, индуктивность 3 Гн, скорость перемещения горелки 200 мм/мин, длина слоя 50 мм, угол наклона горелки 10 градусов, направление наплавки «от себя» – (углом вперед).

Химический состав высокоэнтропийного сплава покрытие приведен в табл.1. Высокоэнтропийные покрытия формировались методом холодного переноса металла [10]. Структура границы раздела сред изучалась методом сканирующей электронной микроскопии (прибор SEM 515 Philips, оснащенный микроанализатором EDAX ECON IV).

Таблица 1. Химический состав высокоэнтропийного покрытия, % (ат.)

Table 1. Chemical composition of high entropy alloys, % (at.)

Co	Cr	Mn	Fe	Ni
28	15	5	37	15

Результаты исследования и их обсуждение

На рис.1. приведено электронно-микроскопическое изображение рельефа поверхности «покрытие/подложка». Граница раздела имеет волнообразный вид, обусловленный вихревым течением материалов. Наличие крупных фрагментов покрытия в подложке свидетельствует о разрушении вихря. Причиной формирования вихревых паттернов, по видимому, является комбинация неустойчивостей Кельвина-Гельмгольца и Рэлея-Тейлора [11].

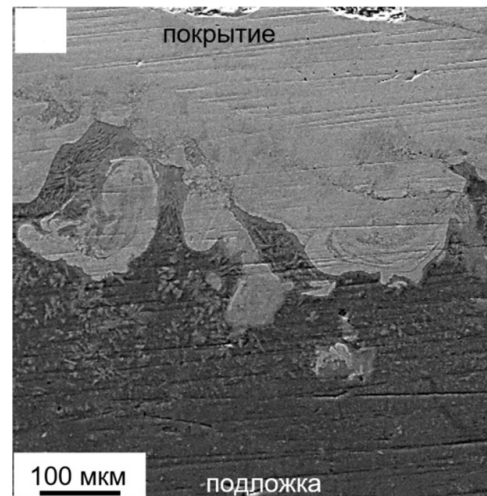


Рис.1. Электронно-микроскопическое изображение структуры контакта «высокоэнтропийное покрытие/подложка»

Fig.1. Electron microscopic image of the contact structure «high-entropy coating/substrate»

Также как и в работе [11] исследование комбинированной неустойчивости будем проводить с помощью метода конечных элементов. Рассмотрим устойчивость плоского стационарного течения двухслойной несжимаемой жидкости в поле массовых сил (рис.2).

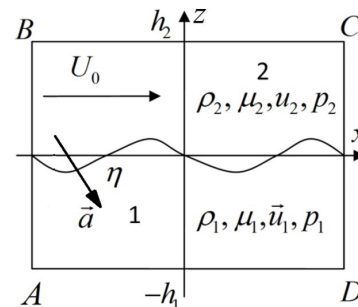


Рис.2. Схема расчетной области

Fig.2. Computation domain scheme

Выберем направление оси x вдоль границы раздела между слоями, а ось y – перпендикулярно x и направлена в сторону второго слоя. Первый слой занимает жидкость с вязкостью ν_1 и плотностью ρ_1 . Вторым слоем является жидкостью с вязкостью ν_2 и плотностью ρ_2 , которая движется с постоянной скоростью u_0 , направленной вдоль оси x и с ускорением a , которое направлено вдоль оси y . Для каждого из слоев запишем уравнения Навье-Стокса:

$$\rho_n \frac{\partial \vec{u}_n}{\partial t} + \rho_n (\vec{u}_n \nabla) \vec{u}_n = -\nabla p + \eta_n \Delta \vec{u}_n + \rho_n \vec{a}_n, \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0$$

где \vec{u} – вектор скорости, p – давление, \vec{a} – ускорение, ρ – плотность, η – динамическая вязкость, $n = 1, 2$ – номера слоев. Система (1) решалась методом конечных элементов. Эволюция поверхности раздела изучалась с помощью метода фазового поля [12, 13]. Динамика двухфазного течения описывается уравнениями Кана-Хилларда. Метод заключается в расчете скалярной функции ϕ на всей расчетной области:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \phi = \nabla \cdot \chi w \nabla \psi, \quad (2)$$

$$\psi = -\nabla \cdot \varepsilon^2 \nabla \phi + (\phi^2 - 1)\phi,$$

где χ – параметр подвижности, w – плотность энергии смеси, ε – параметр, определяющий толщину переходного слоя и равный половине размера ячейки сетки. В численных расчетах параметр подвижности задавался равным $\chi = 1 \text{ м} \cdot \text{с} \cdot \text{кг}^{-1}$. Плотность энергии смеси и толщина переходного слоя связаны с коэффициентом поверхностного натяжения соотношением: $w = 3\varepsilon\sigma/\sqrt{8}$. Начальные условия зададим следующим образом:

$$u_2 = u_0,$$

$$v_2 = V_0 \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right), \quad (3)$$

где V_0 – амплитуда возмущений скорости, λ – длина волны. Граничные условия представлены в табл.2. В расчетных экспериментах амплитуда возмущения скорости предполагалась равной 1 м/с. Характеристики материалов и параметры внешнего воздействия приведены в табл.3. Размеры фрагментов покрытия в подложке (~ 46-180 мкм) показывают, что комбинация неустойчивости проявляется в этом диапазоне длин волн. В этой связи значения λ выбирались в данном диапазоне.

Таблица 2. Граничные условия

Table 2. Boundary condition

Граница	Уравнение	Описание
AB, CD	$\vec{u}_{AB} = \vec{u}_{CD}$ $p_{AB} = p_{CD}$	Периодические граничные условия
BC	$p_2 = p_{in}$	Давление
DC	$u_1 = 0$	Условие прилипания

Сначала рассмотрим формирование рельефа поверхности за счет только неустойчивости Кельвина-Гельмгольца ($\vec{a} = 0$). На рис.3 представлены результаты расчета скалярной функции ϕ при $u_0 = 10 \text{ м/с}$ и $\lambda = 100 \text{ мкм}$.

Из данного рисунка следует, что формирование вихря начинается при $t > 10 \text{ мкс}$ (рис.3а). При $t > 50 \text{ мкс}$ происходит фрагментация вихря на «капли» и процесс их объединения (рис.3б,в). Размеры капель варьируются от 35 до 42 мкм, что не соответствует экспериментальным значениям размеров фрагментов, представленных на рис.1а. Кроме того конфигурация фрагментов покрытия показывает, что помимо неустойчивости Кельвина-Гельмгольца необходимо учитывать неустойчивость Рэлея-Тейлора.

На рис.4 показана эволюция возмущений поверхности раздела по механизму комбинированной неустойчивости Рэлея-Тейлора. Значение ускорения принималось равным 10^7 м/с^2 , а поперечной скорости 50 м/с. Наличие ускорения качественно меняет картину течения материалов. Формирование вихрей начинается при $t > 4 \text{ мкс}$ (рис.4а), а их распад на капли происходит в интервале от 8,4 мкс до 22,5 мкс (рис.4б,в). При $t > 22,5 \text{ мкс}$ начинается процесс интенсивного перемешивания (рис.4г). Размеры частиц находятся в интервале от 1,14 до 117 мкм, что находится в близком согласии с экспериментальными данными. Однако конфигурация границы раздела не соответствует экспериментально наблюдаемой на рис.1. Если учесть горизонтальную составляющую ускорения (рис.5), то при соотношении ускорений $a_y/a_x \sim 0,5$, образование вихрей также как и в предыдущем случае начинается при $t > 4 \text{ мкс}$ (рис.5а). Фрагментация вихрей происходит в интервале от 16,5 мкс до 23 мкс (рис.5б,в), а при $t > 23 \text{ мкс}$ начинается интенсивное перемешивание вещества слоев. Размеры образовавшихся частиц составляют от 57 до 127 мкм, что приблизительно соответствует данным эксперимента. Конфигурация расчетной границы

раздела практически совпадает с экспериментально наблюдаемой на рис.1. Это позволяет сделать вывод о том, что учет горизонтальной

составляющей ускорения позволяет адекватно объяснить формирование волнообразного рельефа границы раздела.

Таблица 3. Физические свойства расплава и параметры внешнего воздействия [14-16]

Table 3. Physical properties of liquid and external action parameters [14-16]

Обозначение	Описание	Значение	
		Материал подложки	Материал покрытия
		АМг5	CoCrMnFeNi
ρ	Плотность	2650 кг/м ³	7700 кг/м ³
μ	Коэффициент динамической вязкости расплава металла	8,94·10 ⁻⁴ Па·с	6,83·10 ⁻³ Па·с
σ_0	Коэффициент межфазного поверхностного натяжения	0,86 Н/м	—
u_0	Горизонтальная компонента скорости высокотемпературного расплава	—	0 м/с 10 м/с 50 м/с
a_y	Ускорение	—	0 м/с ² -1·10 ⁸ м/с ²

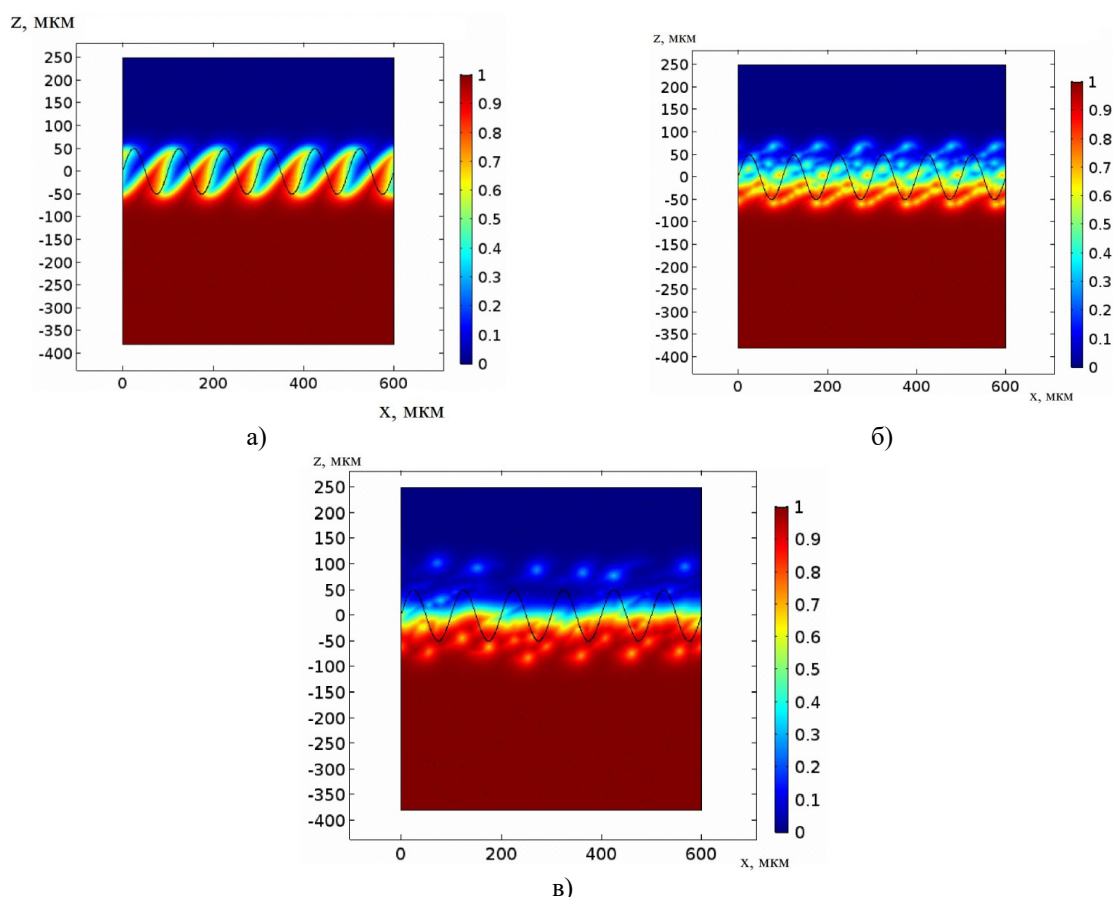


Рис.3. Эволюция возмущений границы раздела покрытие/подложка по механизму неустойчивости Кельвина-Гельмгольца в различные моменты времени (а – 12 мкс; б – 62 мкс; в – 150 мкс)

Fig.3. Evolution of perturbations of the coating/substrate interface by the Kelvin-Helmholtz instability mechanism at various time points (a – 12 μ s; b – 62 μ s; c – 150 μ s)

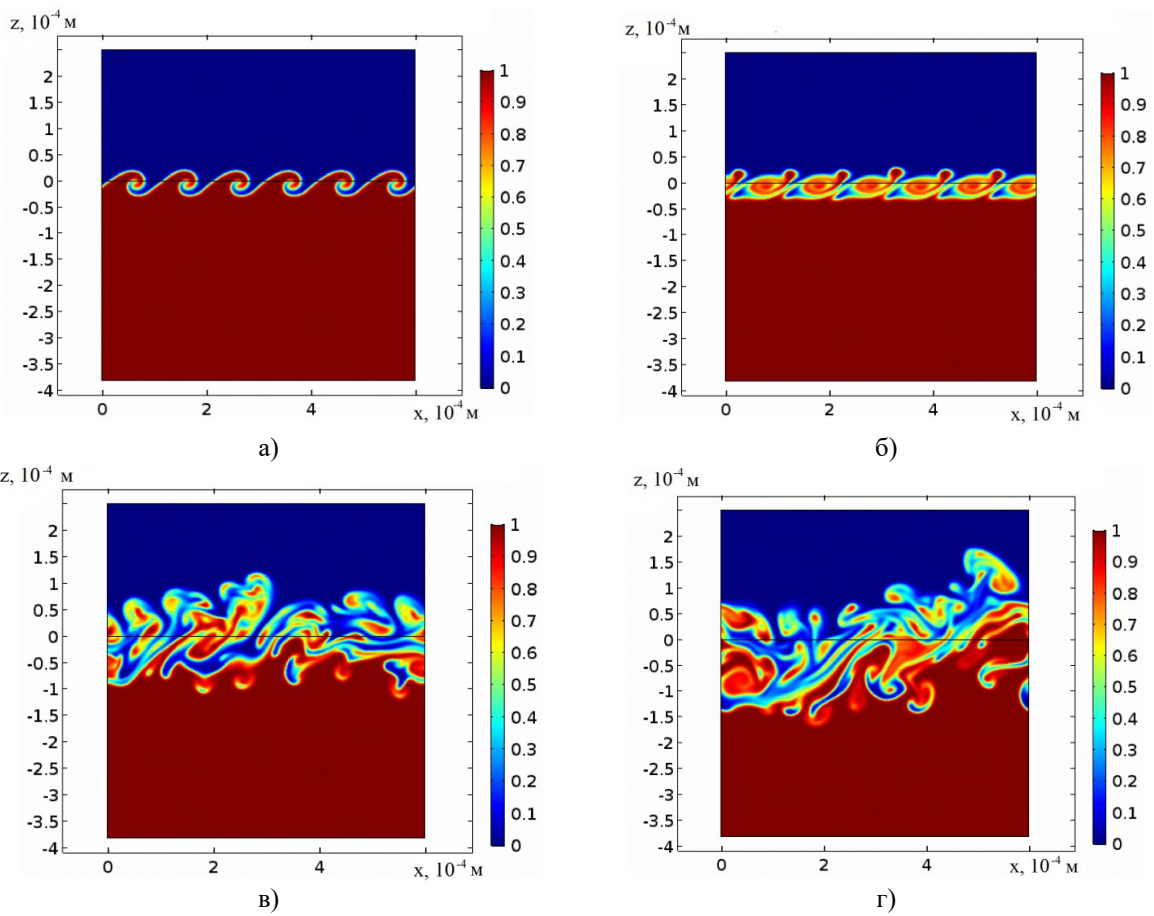
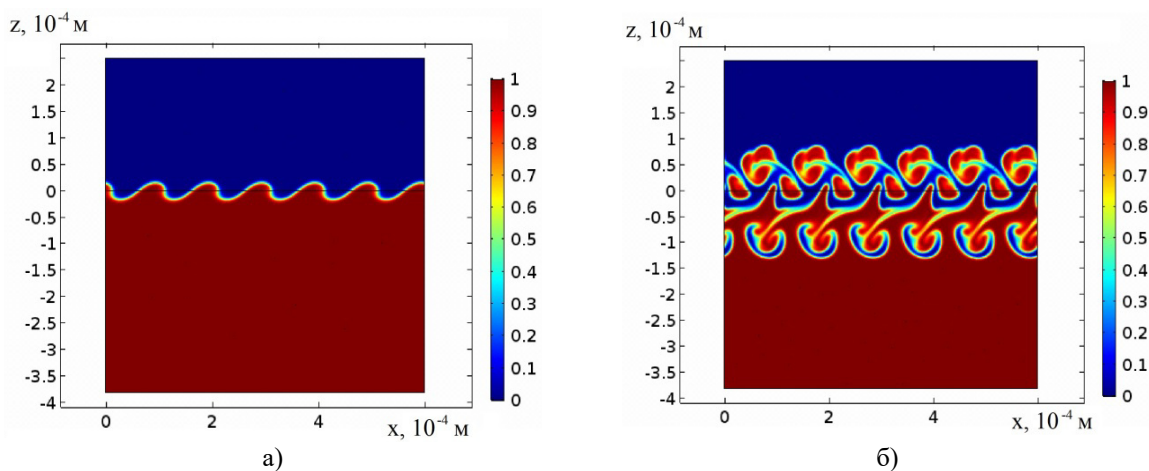


Рис.4. Эволюция возмущений границы раздела покрытие/подложка по механизму неустойчивости Кельвина-Гельмгольца-Рэля-Тейлора при $u_0 = 50$ м/с и $a_y = 10^7$ м/с² в различные моменты времени (а – 4,8 мкс; б – 8,4 мкс; в – 22,5 мкс; г – 27,6 мкс)

Fig.4. Evolution of perturbations of the coating/substrate interface by the Kelvin-Helmholtz-Rayleigh-Taylor instability mechanism at various time points (a – 4.8 μ s; b – 8.4 μ s; c – 22.5 μ s; d – 27.6 μ s)



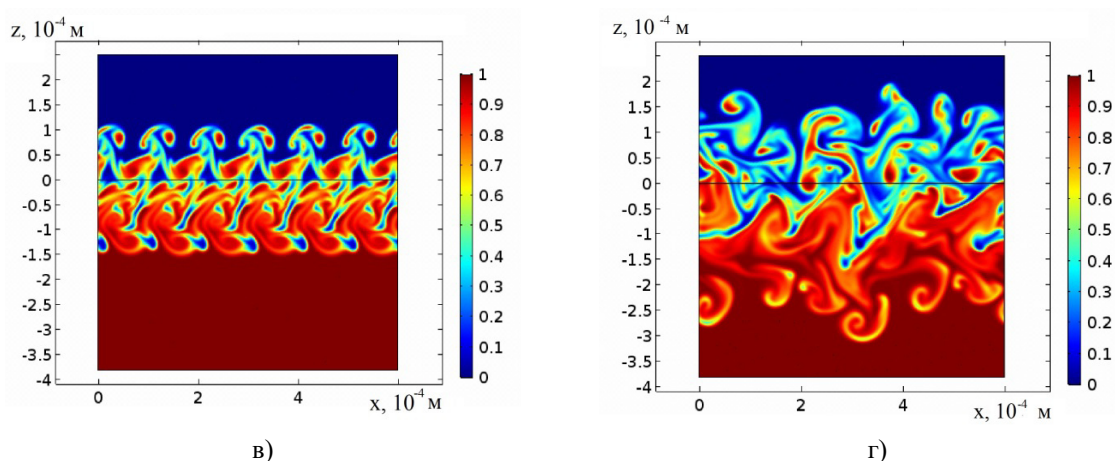


Рис.5. Эволюция возмущений границы раздела покрытие/подложка по механизму неустойчивости Кельвина-Гельмгольца-Рэля-Тейлора при $u_0 = 10$ м/с и $a_y/a_x = 0,5$ в различные моменты времени (а – 6,2 мкс; б – 17,8 мкс; в – 23,9 мкс; г – 37,6 мкс)

Fig.5. Evolution of perturbations of the coating/substrate interface by the Kelvin-Helmholtz-Rayleigh-Taylor instability mechanism at $u_0 = 10$ м/с, $a_y/a_x = 0,5$ and various time points (a – 6.2 μ s; b – 17.8 μ s; c – 23 μ s; d – 37.6 μ s)

Заключение

На основе данных моделирования формирования волнообразного рельефа поверхности раздела «покрытие/подложка» при холодном переносе металла методами конечных элементов установлено, что причиной его формирования является сочетание неустойчивостей Кельвина-Гельмгольца и Рэля-Тейлора.

Показано, что учет горизонтальной составляющей дает адекватное объяснение формирование волнообразного рельефа границы раздела. При отношении составляющих ускорения слоя равном 0,5 и поперечной скорости $u_0 \geq 10$ м/с размеры фрагментов вихря и конфигурация границы раздела практически совпадают с экспериментально наблюдаемой границей раздела.

Список литературы

1. Yeh J.-W. Alloy Design Strategies and Future Trends in High-Entropy Alloys // JOM. 2013. V. 65. P. 1759–1771.
2. Miracle D.B., Senkov O.N. A critical review of high entropy alloys and related concepts // Acta Materialia. 2017. V. 122. P. 448–511.
3. Li Z., Tasan C.C., Springer H., Gault B., Raabe D. Interstitial atoms enable joint twinning and transformation induced plasticity in strong and ductile high-entropy alloys // Scientific Reports. 2017. V. 7. Article 40704.

4. Selvi S., Vishvakshenan A., Rajasekar E. Cold metal transfer (CMT) technology – An overview // Defence Technology. 2018. V. 14. P. 28–44.

5. Pattanayak S., Sahoo S. K. Gas metal arc welding based additive manufacturing – a review // CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. 2021. V. 33. P. 398–442.

6. Tong L.G., Gu J.C., Wang L., Yin S.W. Influences of deposited metal material parameters on weld pool geometry during shield metal arc welding // International Journal of Heat Mass Transfer – 2015. V. 90, Is. 11. P. 968–978.

7. Lyubimov D.V., Lyubimova T.P., Lobov N.I., Alexander J.I.D. Rayleigh-Bénard-Marangoni convection in a weakly non-Boussinesq fluid layer with a deformable surface // Physics of Fluids. 2018. V. 30(2). P. 024103.

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. V. 62. P. 67–70.

9. Панин С.В., Коваль А.В., Трусова Г.В., Почивалов Ю.И., Сизова О.В. Влияние геометрии и структуры границы раздела на характер развития пластической деформации на мезомасштабном уровне борированных образцов конструкционных сталей // Физическая мезомеханика. 2000. Т. 3, № 2. С. 99–115.

10. Gromov V.E., Konovalov S.V., Osintsev K.A. Structure and properties of high entropy alloys. Springer. 2021. 110 p.

11. 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. V. 9(1). P. 539–550.

12. Yang X., Zhao J. Efficient linear schemes for the nonlocal Cahn–Hilliard equation of phase field models // *Computer Physics Communications*. 2019. V. 235. P. 234–245.

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

14. Uporov S., Bykov V., Pryanichnikov S., Shubin A., Uporova N. Effect of synthesis route on structure and properties of AlCoCrFeNi high-entropy alloy // *Intermetallics*. 2017. V. 83. P. 1–8.

15. Rohila S., Mane R.B., Ummethala G., Panigrahi B.B. Nearly full-density pressureless sintering of AlCoCrFeNi-based high-entropy alloy powders *J. Mater. Res.* 2017. V. 34. P. 777–786.

16. Ниженко В.И., Флока Л.С. Поверхностное натяжение жидких металлов и сплавов. М.: *Металлургия*, 1981. 208 с.

Информация об авторах

С. А. Невский – кандидат технических наук, доцент кафедры естественнонаучных дисциплин им. проф. В.М. Финкеля Сибирского государственного индустриального университета.

В. Д. Сарычев – кандидат технических наук, доцент кафедры естественнонаучных дисциплин им. проф. В.М. Финкеля Сибирского государственного индустриального университета.

С. В. Коновалов – доктор технических наук, профессор, проректор по научной и инновационной деятельности Сибирского государственного индустриального университета.

Ю. Ф. Иванов – доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Института Сильноточной электроники СО РАН.

К. А. Осинцев – инженер кафедры технологии металлов и авиационного материаловедения Самарского национального исследовательского университета имени С.П. Королева.

В. Е. Громов – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой естественнонаучных дисциплин им. проф. В.М. Финкеля Сибирского государственного индустриального университета.

References

1. Yeh, J.-W. (2013). Alloy Design Strategies and Future Trends in High-Entropy Alloys. *JOM*, 65, 1759–1771.

2. Miracle, D. B. & Senkov, O. N. (2017). A critical review of high entropy alloys and related concepts. *Acta Materialia*, 122, 448–511.

3. Li, Z., Tasan, C. C., Springer, H., Gault, B. & Raabe, D. (2017). Interstitial atoms enable joint twinning and transformation induced plasticity in strong and ductile high-entropy alloys. *Scientific Reports*, 7, 40704.

4. Selvi, S., Vishvakshnan, A. & Rajasekar, E. (2018). Cold metal transfer (CMT) technology – An overview. *Defence Technology*, 14, 28–44.

5. Pattanayak, S., Sahoo, S. K. (2021). Gas metal arc welding based additive manufacturing – a review. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 33, 398–442.

6. Tong, L. G., Gu, J. C., Wang, L. & Yin, S. W. (2015). Influences of deposited metal material parameters on weld pool geometry during shield metal arc welding. *International Journal of Heat Mass Transfer*, 90 (11), 968–978.

7. Lyubimov, D. V., Lyubimova, T. P., Lobov, N. I. & Alexander, J. I. D. (2018). Rayleigh–Bénard–Marangoni convection in a weakly non-Boussinesq fluid layer with a deformable surface. *Physics of Fluids*, 30(2), 024103.

8. Panin, V. E., Gromov, V. E., Romanov, D. A., Budovskikh, E. A., Panin, S. V. (2017). The physical basics of structure formation in electroexplosive coatings. *Doklady Physics*, 62, 67–70.

9. Panin, S. V. Koval, A. V., Trusova, G. V., Pochivalov, Yu. I. & Sizova O. V. (2000). The influence of the geometry and structure of the interface on the nature of the development of plastic deformation at the mesoscale level of borated structural steel samples. *Fizicheskaya Mesomekhanika*, 3(2), 99–115. (In Russ.).

10. Gromov, V. E., Konovalov, S. V. & Osintsev, K. A. (2021). Structure and properties of high entropy alloys. Springer. P. 110.

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

12. Yang, X. & Zhao, J. (2019). Efficient linear schemes for the nonlocal Cahn–Hilliard equation of phase field models. *Computer Physics Communications*. 235, 234–245.

13. Khachaturyan, A. G. (1983). *Theory of Structural Transformations in Solids*. New York: Wiley. P. 574.

14. Uporov, S., Bykov, V., Pryanichnikov, S., Shubin, A. & Uporova, N. (2017). Effect of synthesis route on structure and properties of Al-CoCrFeNi high-entropy alloy. *Intermetallics*, 83, 1–8.

15. Rohila, S., Mane, R. B., Ummethala, G. & Panigrahi, B. B. (2017). Nearly full-density pressureless sintering of AlCoCrFeNi-based high-entropy alloy powders. *J. Mater. Res.*, 34, 777–786.

16. Nizhenko, V. I. & Floka, L. I. (1981). *Surface tension of liquid metals*. Moscow: Metallurgiya. P. 208.

Information about the authors

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 26.07.2022; одобрена после рецензирования 04.08.2022; принята к публикации 10.08.2022.

The article was received by the editorial board on 26 July 22; approved after reviewing on 04 Aug. 22; accepted for publication on 10 Aug. 22.

S. A. Nevskii – Candidate of Technical Sciences, Docent of Natural Science Department, Siberian State Industrial University.

V. D. Sarychev – Candidate of Technical Sciences, Docent of Natural Science Department, Siberian State Industrial University.

S. V. Konovalov – Doctor of Technical Science, Professor, Vice Rector, Siberian State Industrial University.

Yu. F. Ivanov – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Institute of High Current Electronics SB RAS.

K. A. Osintsev – Engineer of Technology Metals and Aviation Materials Science Department, Samara National Research University.

V. E. Gromov – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of the Department of Natural Sciences named after prof. V.M. Finkel, Siberian State Industrial University.