А.В. ИОНИНА

канд. техн. наук, заведующий кафедрой технических дисциплин и информационных технологий Филиал Кузбасского государственного технического университета имени Т.Ф. Горбачева

1КЛАДНАЯ

МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ НАНОКОМПОЗИТНЫХ СЛОЕВ НА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЯХ ПРИ ЭЛЕКТРОВЗРЫВНОМ ЛЕГИРОВАНИИ

В работе представлен новый механизм формирования наноструктурного слоя в приповерхностной зоне легирования при импульсной плазменной обработке металлов. Механизм основан на неустойчивости Кельвина-Гельмгольца (КГ), возникающей на границе раздела между плазмой и расплавом. Неустойчивость КГ приводит к образованию волн на границе раздела, которые затем распадаются на мелкие капли. Эти капли затвердевают, образуя наноструктурный слой. Предложенный механизм позволяет объяснить: проникновение легирующих элементов на глубину зоны легирования; более равномерное легирование по сравнению с традиционными методами.

Для количественного описания механизма получено дисперсионное уравнение для задачи КГ с учетом вязких и капиллярных напряжений в расплаве. Проведен анализ зависимости инкремента от длины волны возмущений поверхности. Показано, что инкремент имеет максимум в нанометровом диапазоне при относительной скорости плазмы и расплава в диапазоне 100–1000 м/с, достигаемой в условиях обработки. Предложена модель, объясняющая волнообразный характер границы раздела между зоной электровзрывного легирования (ЭВЛ) и основой металла. Модель основана на: развитии неустойчивости КГ на границе раздела расплав-плазма; резонансном взаимодействии волн КГ с неоднородностями границы раздела. Проведены численные расчеты, которые подтверждают предложенный механизм. Получена зависимость амплитуды колебаний границы от времени. Описан процесс размывания границы вследствие перколяционного перемешивания.

Ключевые слова: легирование, импульсная обработка, расплав, механизмы упрочнение, плазма, неустойчивость Кельвина-Гельмгольца, наноструктурный слой.

A.V. IONINA

Cand. of Techn. Sciences, Head of the Department of Technical Disciplines and Information Technologies Branch of Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbachev

MODEL OF FORMATION OF NANOCOMPOSITE LAYERS ON METAL SURFACES WHEN ELECTRO-EXPLOSIVE ALLOYING

The paper presents a new mechanism for the formation of a nanostructured layer in the near-surface doping zone during pulsed plasma treatment of metals. The mechanism is based on the Kelvin-Helmholtz instability (KG), which occurs at the interface between the plasma and the melt. The instability of the KG leads to the formation of waves at the interface, which then disintegrate into small droplets. These droplets solidify to form a nanostructured layer. The proposed mechanism allows us to explain: the penetration of alloying elements into the depth of the alloying zone; more uniform alloying compared with traditional methods.

To quantify the mechanism, a dispersion equation for the KG problem is obtained, taking into account viscous and capillary stresses in the melt. The dependence of the increment on the wavelength of surface disturbances is analyzed. It is shown that the increment has a maximum in the nanometer range at a relative plasma and melt velocity in the range of 100-1000 m/s, achieved under processing conditions. A model is proposed to explain the undulating nature of the interface between the zone of electroexplosive alloying (EVL) and the metal base. The model is based on: the development of instability of KG at the melt-plasma interface; resonant interaction of KG waves with inhomogeneities of the interface. Numerical calculations have been carried out, which confirm the proposed mechanism. The dependence of the amplitude of the boundary oscillations on time is obtained. The process of blurring the boundary due to percolation mixing is described

Keywords: alloying, pulse processing, melt, hardening mechanisms, plasma, Kelvin-Helmholtz instability, nanostructured layer.

1. Введение

Одним из путей расширения номенклатуры изделий из известных сталей является разработка методов повышения служебных характеристик поверхностных слоев с использованием технологий, основанных на применении концентрированных потоков энергии (плазмы, электронов и ионов, лазерного излучения и др.) [1–5], и их различных сочетаний [6–11, 20]. Новые технологии характеризуются кратковременным и локальным высокоэнергетическим воздействием на поверхность, позволяют повышать такие ее функциональные свойства как износо-, жаро- и коррозионная стойкость в несколько раз, и поэтому находят все более широкое применение в промышленности.

Одним из новых методов упрочнения поверхности металлов и сплавов является электровзрывное легирование (ЭВЛ), заключающееся в обработке поверхности многофазными плазменными струями, сформированными при электрическом взрыве проводников. Широкий выбор материалов проводников и порошковых навесок различных веществ, размещаемых в области взрыва, высокие значения температуры и давления плазмы вблизи облучаемой поверхности позволяют осуществлять различные виды легирования, что обусловливает большие перспективы практического использования метода. Дополнительное повышение эксплуатационных свойств материалов после ЭВЛ возможно при последующей электронно-пучковой обработке (ЭПО), вызывающей переплавление поверхности легирования. Вместе с тем, процессы формирования структуры и свойств поверхностных слоев металлов и сплавов при ЭВЛ и последующей ЭПО изучены недостаточно.

Функциональные свойства поверхностных слоев металлов и сплавов определяются, прежде всего, особенностями их структурно-фазовых состояний. Каждый из методов упрочняющей обработки с использованием концентрированных потоков энергии характеризуется определенной областью параметров воздействия на поверхность, что обусловливает возможность формирования структур и соответствующий им комплекс свойств, недостижимых при использовании других аналогичных методов обработки.

Важная особенность ЭВЛ, как одного из таких методов, состоит в том, что источником легирующих элементов является сама многофазная струя продуктов взрыва, а также порошковые частицы различных веществ, вводимых в область взрыва. Результаты ЭВЛ определяются совместным влиянием на упрочняемую поверхность теплового, силового и химического факторов обработки. При этом на поверхности зоны легирования формируется покрытие с высокоразвитым рельефом, образованное порошковыми частицами и конденсированными частицами продуктов взрыва проводников, которые располагаются в тылу формируемой многофазной плазменной струи. Расширение области практического использования метода возможно при сочетании ЭВЛ и ЭПО, которые имеют сопоставимые значения поглощаемой плотности мощности, глубины и диаметра зоны воздействия на облучаемую поверхность.

Цель настоящей работы является выявление закономерностей формирования рельефа поверхности, градиента строения и фазового состава по глубине стали 45 после электровзрывного боромеднения, а также разработка модели формирования упрочняемых слоев при электровзрывном легировании.

2. Материал и методы исследования

Выбор стали 45 для исследования процессов обработки поверхности методами ЭВЛ в настоящей работе был обусловлен тем, что она обладает высокими эксплуатационными свойствами и широко применяется в промышленности [2].

Образцы стали для обработки в виде цилиндрических шайб высотой 3–5 мм вырезали из прутка диаметром 20 мм, который был отожжен при температуре 850 °C в течение 1,5 ч и охлажден вместе с печью. В результате данной термообработки в материале была сформирована структура, представленная зернами структурно-свободного феррита и колониями пластинчатого перлита.

Для формирования многофазных плазменных струй с целью осуществления электровзрывного боромеднения использовали электровзрывную установку ЭВУ 60/10 [3]. Важная особенность ЭВЛ, как одного из таких методов, состоит в том, что источником легирующих элементов является сама многофазная струя продуктов взрыва, а также порошковые частицы различных веществ, вводимых в область взрыва. Результаты ЭВЛ определяются совместным влиянием на упрочняемую поверхность теплового, силового и химического факторов обработки. При этом на поверхности зоны легирования формируется покрытие с высокоразвитым рельефом, образованное порошковыми частицами и конденсированными частицами продуктов взрыва проводников, которые располагаются в тылу формируемой многофазной плазменной струи.

Расширение области практического использования метода возможно при сочетании ЭВЛ и ЭПО, которые имеют сопоставимые значения поглощаемой плотности мощности, глубины и диаметра зоны воздействия на облучаемую поверхность [7–11, 20].

Методы исследования. Для измерения толщины слоев, размеров зерен, изучения распределения фаз по глубине зоны легирования и фотографирования шлифов использовали металлографический микроскоп «Olympus GX-51». Этот прибор позволяет получать изображение мелких объектов и их деталей при различных увеличениях до 1000 крат.

Исследование рельефа поверхности образцов осуществляли методами сканирующей электронной микроскопии с использованием прибора «Carl Zeiss EVO50». Элементный состав поверхностного слоя стали 45 после обработки определяли, используя энергодисперсионный рентгеновский микроанализатор EDS X-Act, являющийся приставкой сканирующего электронного микроскопа Carl Zeiss EVO50.

Рентгеноструктурный анализ выполняли на дифрактометрах «ДРОН-2.0» в железном Кα-излучении и «ARL X'TRA» в медном К_α-излучении. Диапазон углов на дифрактометре «ДРОН-2» 20 между первичным и дифрагированным пучками изменяли от 30 до 140 градусов при скорости перемещения счётчика излучения 2 град./мин. Параметры дифрактометра ARL X'TRA: излучение – Си (λ_α = 0,15406 нм), мощность трубки – 2,2 кВт, энергодисперсионный детектор Si(Li), максимальный угол 20 = 164 градусов.

3. Результаты исследования и их обсуждение

Рентгеноспектральный анализ показал равномерное распределение легирующих элементов по глубине зоны легирования (рис. 1).

При обработке с оплавлением поверхности металлов и сплавов импульсными многофазными плазменными струями, сформированными при электрическом взрыве проводников, происходит образование зоны легирования с градиентной структурой. Обработка проводится в условиях действия на поверхность поглощаемой плотности мощности 10⁹ Вт/м² при давлении 10⁶–10⁷ Па. Электронно-микроскопические



Рис. 1. Рентгеноспектральный микроанализ зоны электровзрывного боромеднения при п = 3,4 и q_p = 8,6 ГВт/м². Сканирующая электронная микроскопия



Рис. 2. Схема развития неустойчивости Кельвина-Гельмгольца на поверхности зоны легирования для моментов времени $t_1 < t_2 < t_3 < t_4 < t_5$

исследования показали (рис. 2), что тонкий (1–2 мкм) приповерхностный слой зоны легирования является наноструктурным, размер кристаллитов в котором составляет величину порядка 10 нм.

Механизм его образования можно связать с формированием волнообразного рельефа на границе раздела плазма – расплав (рис. 2). При нормальном натекании плазменной струи на поверхность при электровзрывном легировании (ЭВЛ) происходит разворот плазменного потока и возникает область параллельного течения плазмы и жидкого металла с различными скоростями. Тангенциальный разрыв скорости приводит к гидродинамической неустойчивости Кельвина-Гельмгольца и образованию вблизи поверхности слоя завихренного расплава. Характерный размер вихрей и образующихся при последующей кристаллизации структурных составляющих приповерхностного слоя зоны легирования определяется наиболее неустойчивой длиной волны. Таким образом, главным в описании механизма формирования наноструктурного слоя является определение области параметров плазменной струи, при которых возможно появление неустойчивых волн с длиной волны порядка 10 нм.

Для получения дисперсионного уравнения рассмотрим задачу о неустойчивости Кельвина-Гельмгольца границы раздела двух полубесконечных слоев несжимаемой жидкости с учетом вязких и капиллярных напряжений. Ось *x* направлена вдоль тангенциального разрыва скорости (рис. 3). Область *y* < 0 занимает расплав, а *y* > 0 – плазма. Расплав является вязкой жидкостью с плотностью ρ_1 , кинематической вязкостью v и скоростью скольжения u_1 , направленной вдоль оси *x*, а натекающая плазма – идеальной несжимаемой жидкостью с плотностью ρ_2 и скоростью u_2 скольжения вдоль оси *x*. Силой тяжести пренебрегаем. Коэффициент поверхностного натяжения σ_0 на границе раздела постоянный. Касательные составляющие напряжений для вязкой жидкости на границе раздела $\eta = \eta(x, t)$ равны нулю.

Разность нормальных напряжений между вязкой и идеальной жидкостями имеет скачок, связанный с поверхностным натяжением. Выполняется кинематическое условие для двух сред. Используем линейное приближение в уравнениях и граничных условиях. Обозначим как U_n , V_n , P_n возмущения продольных по оси х и поперечных по оси у скоростей и давлений в двух средах соответственно (n = 1 - вязкая, n = 2 - идеальная жидкость), которые удовлетворяют дифференциальным уравнениям Навье-Стокса и Эйлера. Краевая задача включает систему уравнений Навье-Стокса для первого слоя. При записи уравнений движения пренебрегали конвективными слагаемыми, т.к. они квадратичны (малые второго порядка).

В области – $\infty < x < \infty$, – $\infty < y < 0$:

$$\frac{\partial U_1}{\partial t} + u_1 \frac{\partial U_1}{\partial x} = -\frac{1}{\rho_1} \frac{\partial P_1}{\partial x} + \left(\frac{\partial^2 U_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U_1}{\partial y^2}\right);$$
$$\frac{\partial V_1}{\partial t} + u_1 \frac{\partial V_1}{\partial x} = -\frac{1}{\rho_1} \frac{\partial P_1}{\partial y} + \left(\frac{\partial^2 V_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_1}{\partial y^2}\right), \tag{1}$$

$$\frac{\partial U_1}{\partial x} + \frac{\partial V_1}{\partial y} = 0$$
, а в области $-\infty < x < \infty, 0 < y < +\infty$:

$$\frac{\partial U_2}{\partial t} + u_2 \frac{\partial U_2}{\partial x} = -\frac{1}{\rho_2} \frac{\partial P_2}{\partial x}; \quad \frac{\partial V_2}{\partial t} + u_2 \frac{\partial V_2}{\partial x} = -\frac{1}{\rho_2} \frac{\partial P_2}{\partial y}; \quad \frac{\partial U_2}{\partial x} + \frac{\partial V_2}{\partial y} = 0.$$
(2)

Граничные условия для (1) и (2) имеют вид:

$$y \to \pm \infty$$
: $U_n, V_n, P_n \to 0; n = 1, 2.$ (3)



Рис. 3. Граничные условия раздела двух полубесконечных слоев несжимаемой жидкости с учетом вязких и капиллярных напряжений

На границе раздела при y = 0 они включают кинематическое и динамическое условия:

$$\frac{\partial}{\partial t} + u_1 \frac{\partial}{\partial x} = V_1; \quad \frac{\partial}{\partial t} + u_2 \frac{\partial}{\partial x} = V_2;$$

$$-P_1 + 2\rho_1 \frac{\partial V_1}{\partial y} + P_2 = \sigma_0 \frac{\partial^2}{\partial x^2}; \quad \frac{\partial U_1}{\partial y} + \frac{\partial V_1}{\partial x} = 0.$$
(4)

Решение задачи (1-4) представим в виде:

$$U_{n}(x, y, t) = \overline{U}_{n}(y)e^{(\omega t - ikx)}, V_{n}(x, y, t) = \overline{V}_{n}(y)e^{(\omega t - ikx)},$$
$$P_{n}(x, y, t) = \overline{P}_{n}(y)e^{(\omega t - ikx)}, (x, t) =_{0} e^{(\omega t - ikx)}.$$
(5)

где ω – циклическая частота, t – время, i – мнимая единица, k – волновое число, \overline{U}_n , \overline{V}_n , \overline{P}_n – амплитудные значения скоростей и давления соответственно, η_0 – отклонение границы раздела от y = 0.

Подстановка (5) в первое уравнение (1) дает:

$$\frac{\partial \left(U_{1}(y)e^{(\omega t-ikx)}\right)}{\partial t} + u_{1}\frac{\partial \left(U_{1}(y)e^{(\omega t-ikx)}\right)}{\partial x} =$$

$$= -\frac{1}{\rho_{1}}\frac{\partial \left(P_{1}(y)e^{(\omega t-ikx)}\right)}{\partial x} + \left(\frac{\partial^{2}\left(U_{1}e^{(\omega t-ikx)}\right)}{\partial x^{2}} + \frac{\partial^{2}\left(U_{1}e^{(\omega t-ikx)}\right)}{\partial y^{2}}\right),$$

$$U_{1}(y) - u_{1}ikU_{1} = \frac{ik}{\rho_{1}}P_{1}(y) + \left(\frac{\partial^{2}U_{1}}{\partial y^{2}} - U_{1}k^{2}\right),$$

обозначая
$$k_1^2 = k^2 + \frac{\Omega_1}{\nu}$$
, где $\Omega_1 = \omega - iku_1$ получим
 $\frac{\partial^2 U_1}{\partial y^2} + \frac{ik}{\rho_1} P_1(y) - U_1 k_1^2 = 0.$ (6)

Подставим (5) во второе уравнение (1)

$$\frac{\partial \left(V_{1}\left(y\right)e^{(\omega t-ikx)}\right)}{\partial t} + u_{1}\frac{\partial \left(V_{1}\left(y\right)e^{(\omega t-ikx)}\right)}{\partial x} = -\frac{1}{\rho_{1}}\frac{\partial \left(P_{1}\left(y\right)e^{(\omega t-ikx)}\right)}{\partial y} + \left(\frac{\partial^{2}\left(V_{1}e^{(\omega t-ikx)}\right)}{\partial x^{2}} + \frac{\partial^{2}\left(V_{1}e^{(\omega t-ikx)}\right)}{\partial y^{2}}\right),$$

$$\frac{\partial^{2}V_{1}}{\partial y^{2}} + \frac{1}{\rho_{1}}\frac{\partial P_{1}}{\partial y} - V_{1}k_{1}^{2} = 0.$$
(7)

Подставим (5) в третье уравнение (1)

$$\frac{\partial \left(U_{1}(y)e^{(\omega t - ikx)} \right)}{\partial x} + \frac{\partial \left(V_{1}(y)e^{(\omega t - ikx)} \right)}{\partial y} = 0$$
$$\frac{\partial V_{1}(y)}{\partial y} - ikU_{1} = 0.$$
(8)

Исключим из системы (6–8) U_1 , давление и продольная скорость вязкой жидкости записываются через вертикальную скорость.

Выражаем из уравнения (6) давление

$$P_{1} = \frac{\rho_{1}}{ik} \left(k_{1}^{2} U_{1} - \frac{d^{2} U_{1}}{dy^{2}} \right) = \frac{i\rho_{1}}{k} \left(\frac{d^{2} U_{1}}{dy^{2}} - k_{1}^{2} U_{1} \right),$$

и подставим в него U_1 следующее из (8)

$$U_1 = \frac{1}{ik} \frac{dV_1}{dy}.$$
(9)

Получим

$$P_{1} = \frac{\rho_{1}}{k^{2}} \left(\frac{d^{3}V_{1}}{dy^{3}} - k_{1}^{2} \frac{dV_{1}}{dy} \right).$$
(10)

Продифференцируем давление по у

$$\frac{dP_1}{dy} = \frac{\rho}{k^2} \left(\frac{d^4 V_1}{dy^4} - k_1^2 \frac{d^2 V_1}{dy^2} \right).$$
(11)

Подставим (11) в (7) получим дифференциальное уравнению четвертого порядка для поперечной скорости (основное уравнение линейной теории):

$$\frac{d^4 V_1}{dy^4} - \frac{d^2 V_1}{dy^2} \left(k^2 + k_1^2\right) + k^2 k_1^2 V_1 = 0.$$
(12)

Подставим (5) в первое уравнение (2)

$$\frac{\partial \left(U_2(y) e^{(\omega t - ikx)} \right)}{\partial t} + u_2 \frac{\partial \left(U_2(y) e^{(\omega t - ikx)} \right)}{\partial x} = -\frac{1}{\rho_1} \frac{\partial \left(P_2(y) e^{(\omega t - ikx)} \right)}{\partial x},$$

$$U_{22} - \frac{ik}{\rho_2} P_2 = 0,$$
(13)

где

$$\Omega_2 = \omega - iku_2. \tag{14}$$

Подставим (5) во второе уравнение (2)

$$\frac{\partial \left(V_{2}(y)e^{(\omega t - ikx)}\right)}{\partial t} + u_{2}\frac{\partial \left(V_{2}(y)e^{(\omega t - ikx)}\right)}{\partial x} = -\frac{1}{\rho_{2}}\frac{\partial \left(P_{2}(y)e^{(\omega t - ikx)}\right)}{\partial y},$$

$$V_{22} - \frac{1}{\rho_{2}}\frac{\partial P_{2}}{\partial y} = 0.$$
(15)

Подставим (5) в третье уравнение (2)

$$\frac{\partial \left(U_2(y) e^{(\omega t - ikx)} \right)}{\partial x} + \frac{\partial \left(V_2(y) e^{(\omega t - ikx)} \right)}{\partial y} = 0$$
$$\frac{\partial V_2(y)}{\partial y} - ikU_2 = 0.$$
(16)

Из уравнения (13) выражаем P_2

$$P_2 = \frac{\rho_{22} U_2}{ik}.$$
 (17)

В уравнении (16) продольная скорость для идеальной жидкости U_2 выражается через вертикальную скорость V_2 связаны следующим образом

$$U_2 = \frac{1}{ik} \frac{dV_2}{dy}.$$
(18)

Подставляем (18) в (17) получаем давление для идеальной жидкости, выраженное через V₂:

$$P_{2} = \frac{\rho_{2}\Omega_{2}}{ik} \frac{1}{ik} \frac{dV_{2}}{dy} = -\frac{\rho_{2}\Omega_{2}}{k^{2}} \frac{dV_{2}}{dy}.$$
 (19)

Продифференцируем P_2 по координате у

$$\frac{dP_2}{dy} = -\frac{\rho_2 \Omega_2}{k^2} \frac{d^2 V_2}{dy^2}.$$
 (20)

Теперь воспользуемся вторым уравнением Эйлера из системы (2)

$$\Omega_2 V_2 - \frac{1}{\rho} \frac{\rho_2 \Omega_2}{k^2} \frac{d^2 V_2}{dy^2} = 0,$$

и перепишем его в виде, получая дифференциальное уравнение второго порядка для идеальной среды:

$$\frac{d^2 V_2}{\partial y^2} - k^2 V_2 = 0.$$
⁽²¹⁾

В четвертое уравнение системы (4) подставляем U_1, V_1

$$\frac{dU_1}{dy}e^{(\omega t - ikx)} + \frac{dV_1}{dx}e^{(\omega t - ikx)} = 0$$

$$\frac{dU_1}{dy} - ikV_1 = 0,$$
(22)

Используя (9) получаем

$$\frac{d^2 V_1(0)}{\partial y^2} - k^2 V_1(0) = 0.$$
(23)

В первое уравнение системы (4) подставляем четвертое уравнение системы (5) получаем равенство

$$\eta_0 \omega \exp^{(\omega t - ikx)} - iku_1 \eta_0 e^{(\omega t - ikx)} = V_1,$$

откуда V_1 равно

$$V_1 = \eta_0 \Omega_1 e^{(\omega t - ikx)}.$$
 (24)

Во второе уравнение системы (4) подставляем четвертое уравнение системы (5) получаем равенство

$$\eta_0 \omega \exp^{(\omega t - ikx)} - iku_2 \eta_0 e^{(\omega t - ikx)} = V_2$$

Получаем аналогичное выражение для V₂

$$V_2 = \eta_0 \Omega_2 \exp^{(\omega t - ikx)}.$$
 (25)

Из уравнений (24) и (25) получаем связь между V_1 и V_2

$$\frac{V_1(0)}{\Omega_1} = \frac{V_2(0)}{\Omega_2}.$$
(26)

В третье уравнение системы (4) подставляем P_1 , P_2

$$-\frac{\rho}{k^{2}}\left(\frac{d^{3}V_{1}}{dy^{3}}-k_{1}^{2}\frac{dV_{1}}{dy}\right)+2\rho_{1}\frac{dV_{1}}{dy}-\frac{\rho_{2}\Omega_{2}}{k^{2}}\frac{dV_{2}}{dy}=\sigma_{0}\frac{\partial^{2}\eta}{\partial x^{2}}.$$
(27)

Вторая производная от η по *x* равна

$$\frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} = -\eta_0 k^2 \exp^{(\omega t - ikx)}.$$

Приравниваем выражение (27) к (5.26) получаем

$$\rho_{1} \left[\frac{d^{3}V_{1}(0)}{dy^{3}} - \frac{dV_{1}(0)}{dy} \left(k_{1}^{2} + 2k^{2} \right) \right] + \rho_{2} \Omega_{2} \frac{dV_{2}(0)}{dy} = \frac{\sigma_{0}k^{4}}{\Omega_{1}} V_{1}(0).$$
(28)

Граничные условия при $y = -\infty$ с учетом (3) можно записать в виде:

$$\frac{dV_1}{dy} = 0; \quad V_1(-\infty) = 0.$$
(29)

Граничные условия при $y = -\infty$ с учетом (3) можно записать в виде:

$$V_2(\infty) = 0. \tag{30}$$

Уравнение (12) запишем в следующем виде

$$V_1^4 - \left(k_1^2 + k^2\right)V_1^2 + k_1^2k^2V_1 = 0.$$
 (31)

Ищем решение (31) в виде

$$V = A e^{\lambda y}.$$
(32)

Подставляя (32) в (31) получается уравнение:

$$\left(\lambda^{4} - \left(k_{1}^{2} + k^{2}\right)\lambda^{2} + k_{1}^{2}k^{2}\right)Ae^{\lambda y} = 0,$$
(33)

отсюда характеристическое уравнение получается в следующем виде

$$\lambda^{4} - (k_{1}^{2} + k^{2})\lambda^{2} + k_{1}^{2}k^{2} = 0$$

$$(\lambda^{2})_{1,2} = \frac{(k_{1}^{2} + k^{2}) \pm \sqrt{(k_{1}^{2} + k^{2}) - 4k_{1}^{2}k^{2}}}{2} = \frac{k_{1}^{2} + k^{2} \pm (k_{1}^{2} - k^{2})}{2}.$$

Его решение

 $\lambda_{1,2} = \pm k; \ \lambda_{3,4} = \pm k_1.$

Тогда общее решение (31) в экспоненциальном виде представим

$$V_1 = \tilde{C}_1 e^{ky} + \tilde{C}_2 e^{-ky} + \tilde{C}_3 e^{k_1 y} + \tilde{C}_4 e^{-k_1 y}.$$
 (34)

Решение уравнения (31) с учетом граничных условий (29) запишем:

$$V_1(y) = C_1 e^{ky} + C_2 e^{k_1 y}.$$
(35)

Для определения C_1 , C_2 получаем систему алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} C_1 \cdot a_{11} + C_2 \cdot a_{12} = 0\\ C_1 \cdot a_{21} + C_2 \cdot a_{22} = 0 \end{cases}$$
(36)

где

 $a_{11} = \rho \nu \Omega k^{2} + \sigma_{0} k^{3} + \rho \nu \Omega k_{1}^{2},$ $a_{12} = k(\sigma_{0} k^{2} + 2\rho \nu \Omega k_{1}),$ $a_{12} = 2k^{2}, \ a_{22} = k^{2} + k_{1}^{2}.$ (37)

Для дифференциального уравнения

$$V_2^{"} - k^2 V_2 = 0, (38)$$

получаем характеристическое уравнение $\lambda^2 - k^2 = 0$, корни которого $\lambda_{1,2} = \pm k$, следовательно, общее решение имеет вид

$$V_2 = A_1 e^{-ky} + A_2 e^{ky}, (39)$$

где A_1, A_2 – произвольные постоянные.

Т.к. $V_2(\infty) = 0$, то $A_2 = 0$. Скорость в идеальной жидкости записываем в виде

$$V_{2} = Ae^{-ky}.$$
(40)

Из условия отсутствия возмущений на –∞, следует, что

$$Re(k_1) > 0.$$
 (41)

Из равенства нулю определителя (37) получаем характеристическое уравнение:

$$\rho_1 v^2 (k_1^4 + 2k_1^2 k^2 - 4k_1 k^3 + k^4) + + \rho_2 v^2 (k_1^2 - k^2 + ik(u_2 - u_1) / v)^2 + \sigma_0 k^3 = 0,$$
(42)

для упрощения которого используется замена

$$z = \frac{k_1}{k} = \sqrt{1 + \left(\omega - iku_1\right) / \nu k^2}.$$

В результате получается алгебраическое уравнение четвертой степени с комплексными коэффициентами, которое поддается анализу в широком диапазоне параметров:

$$(z-1)(z^{3}+z^{2}+3z-1)+\mu(z^{2}-1+i\omega_{1})^{2}+\omega_{0}^{2}=0.$$
 (43)

Входящие в уравнение (43) параметры имеют смысл отношения соответствующих частот

$$\omega_{0} = \frac{\omega_{\sigma}}{\omega_{v}}, \quad \omega_{1} = \frac{\omega_{\gamma}}{\omega_{v}},$$
$$\omega_{\sigma} = \sqrt{\frac{\sigma k^{3}}{\rho_{1}}}, \quad \omega_{v} = k^{2}, \quad \omega_{\gamma} = (u_{2} - u_{1})k.$$
(44)

Параметр $\mu = \rho_2 / \rho_1$ определяется как отношение плотности плазмы к плотности жидкости.

Уравнение (43) является уравнением относительно *z* с тремя безразмерными параметрами $p = (\mu, \omega_0, \omega_1)$. Дисперсионное уравнение для постоянного внешнего потока было выведено в [13]. В [14, 15] изучалась неустойчивость Кельвина-Гельмгольца с учетом вязкости только в граничных условиях. Полученные ранее дисперсионные уравнения отличаются от (43). Если в (43) пренебречь вторым слагаемым, то получается уравнение, описывающее волны в вязкой жидкости, обстоятельно исследованное в классических монографиях [16, 17].

Можно сузить пространство параметров, рассматривая воздействие плазменного потока на образец чистого железа, полагая, что для него:

$$v = 6 \cdot 10^{-7} \frac{M}{c^2}, \quad \rho_1 = 6, 3 \cdot 10^3 \frac{\kappa \Gamma}{c^3}, \quad \sigma_0 = 1, 7 \frac{H}{M},$$

а для плазмы $\rho_{2}\approx 1~{\rm kr/m^{2}}$ [3]. Тогда получаем для параметров задачи

$$\mu = \frac{\rho_2}{\rho_1} = 10^{-4}, \quad \omega_1 = \frac{u_2 - u_1}{\nu k} = 0,027u_0\lambda$$
$$\omega_0^2 = \frac{\sigma}{\nu^2 \rho_1 k} = \lambda = 0,12\lambda, \quad (45)$$

где λ – длина волны (нм), u_0 – относительная скорость (м/с).

Пространство параметров сократилось до двух с определенным диапазоном их изменения: $\lambda = 1-40$ нм, $u_0 = 100 - 1000$ м/с.

Обозначим инкремент

$$\alpha = Re(\omega) = Re(\Omega_1) = Re(\nu k^2(z^2 - 1))$$
(46)

и определим зависимости α от λ , когда $\alpha > 0$ в диапазоне $\lambda \div 100$ нм. Для выявления неустойчивости численно решаем уравнение (43) с условием (41) для определения *z*, а затем α рассчитывается по формуле (46) в указанном диапазоне длин волн. Из полученных зависимостей для различных значений относительных скоростей (рис. 4) видно, что инкремент немонотонно зависит от длины волны. Максимальное значение α_{max} достигается при λ_{max} , которое зависит от относительной скорости (рис. 5). Среди серии кривых на рисунке 3 условиям эксперимента (10 нм) соответствует скорость 670 м/с, которая реализуется



Рис. 4. Зависимость инкремента неустойчивости Кельвина-Гельмгольца от длины волны. 1, 2, 3 соответствуют относительным скоростям, равным 759, 670 и 350 м/с

Рис. 5. Зависимость длины волны, соответствующей максимуму инкремента, от относительной скорости λ = 1 – 40 нм, u₀ = 100–1000 м/с



в экспериментах по электровзрывному легированию [18].

Таким образом, предложенный механизм позволяет адекватно описывает образование приповерхностного наноструктурного слоя зоны легирования в рамках развития неустойчивости Кельвина-Гельмгольца в вязком жидком слое.

4. Заключение

Предложен новый механизм формирования тонкого приповерхностного наноструктурного слоя зоны легирования при обработке с оплавлением поверхности металлов импульсной плазменной струей, сформированной из продуктов электрического взрыва проводников, позволяющий объяснить проникновение легирующих элементов на глубину зоны легирования. Механизм основан на возникновении неустойчивости Кельвина-Гельмгольца поверхности раздела плазма-расплав. Получено дисперсионное уравнение для задачи Кельвина-Гельмгольца с учетом вязких и капиллярных напряжений в расплаве. Проведен анализ зависимости инкремента от длины волны возмущений поверхности с максимумом в нанометровом диапазоне при относительной скорости плазмы и расплава в диапазоне 100-1000 м/с, достигаемой в условиях обработки.

Предложена модель, объясняющая волнообразный характер границы раздела зоны электровзрывного легирования с основой металла, исходя из возникновения неустойчивости Кельвина-Гельмгольца. Получена зависимость амплитуды колебаний границы от времени. Описан процесс размывания границы вследствие перколяционного перемешивания.

Список литературы

- 1. Соснин Н.А., Ермаков С.А., Тополянский П.А. Плазменные технологии. Сварка, нанесение покрытий, упрочнение. М.: Машиностроение. 2008. 406 с.
- Будовских Е.А., Багаутдинов А.Я., Вострецова А.В., Громов В.Е. Закономерности электровзрывного легирования металлов и сплавов // Известия вузов. Физика. 2008. Т. 51. № 5. С. 71–83. EDN IXVYKX.
- Вострецова А.В., Ващук Е.С., Будовских Е.А., Карпий С.В., Иванов Ю.Ф., Громов В.Е. Особенности импульсной электронно-пучковой обработки поверхности электровзрывного легирования стали 45 и титана // Структурно-фазовые состояния перспективных металлических металлов / Отв.ред. В.Е. Громов. Новокузнецк: Изд-во НПК, 2009. С. 28–41.
- Gromov V.E., Yuriev A.B., Morozov K.V., Ivanov Y.F. *Microstructure of quenched rails*. Cambridge, ISP Ltd. 2016. 153 p.

- Ivanov Yu.F., Glezer A.M., Kuznetsov R.V., Gromov V.E., Shliarova Yu.A., Semin A.P., Sundeev R.V. Fine structure formation in rails under ultra long-term operation // *Materials Letters*. 2022. Vol. 309. P. 131378.
- Bauri L.F., Alves L.H.D., Pereira H.B., Tschiptschin A.P., Goldenstein H. The role of welding parameters on the control of the microstructure and mechanical properties of rails welded using FBW // Journal of Materials Research and Technology. 2020. Vol. 9(4). Pp. 8058–8073.
- Ионина А.В. Анализ микротвердости поверхностных слоёв стали после различных видов комбинированной обработки // Вопросы современной науки: проблемы, тенденции и перспективы: Материалы VII международной научно-практической конференции, приуроченной к Году педагога и наставника, Новокузнецк, 08 декабря 2024 года. Кемерово: Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 2023. С. 250–253. EDN PICPVJ.
- Вострецова А.В., Будовских Е.А., Иванов Ю.Ф., Громов В.Е. Формирование поверхностных слоев при электронно-пучковой обработке поверхности электровзрывного бороалитирования стали 45 // Актуальные проблемы прочности: Сборник материалов 50-ого Международного научного симпозиума, Витебск, 27 сентября – 2010 года. Витебск: Витебский государственный технологический университет, 2010. С. 103–104. – EDN UIIGCO.
- Rodrigues K.F., Mourão G.M.M., Faria G.L.F. Kinetics of isothermal phase transformations in premium and standard rail steels // *Steel Res Int.* 2021. Vol. 92(2). P. 2000306.
- Rodrigues K.F., Faria G.L. Characterization and Prediction of Continuous Cooling Transformations in Rail Steels // Materials Research. 2021. Vol. 24(5). P. 20200519.
- Ионина А.В., Будовских Е.А. Особенности формирования градиентных структур на поверхности титана ВТ1-0 после комбинированной обработки // Прикладная физика и математика. 2023.
 № 2. С. 3–10. – DOI 10.25791/pfim.02.2023.1253. – EDN XVIFDM
- 12. Ващук Е.С., Романов Д.А., Ионина А.В., Аксенова К.В. Микротвердость поверхности и структура конструкционной стали после обработки концентрированным плазменным потоком и импульсным электронным пучком // Фундаментальное и прикладное материаловедение: Труды XX Международной научной школыконференции, Барнаул, 17 октября 2023 года. Барнаул: Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, 2023. С. 62–71. – EDN REAJMA.

- 13. Уизем Дж. *Линейные и нелинейные волны*. М.: Мир. 1977. 623 с.
- Власов В.П., Жданов С.К., Трубников Б.А. Нелинейная теория устойчивости Кельвина-Гельмгольца // Известия АН СССР. МЖГ. 1991. № 3. С. 10–16.
- Анищик В.М., Асташинский В.М., Квасов Н.Т. и др. Неустойчивость Кельвина-Гельмгольца при взаимодействии компрессионной плазмы с веществом // Физика и химия обработки материалов. 2008. № 5. С. 27–33.
- Ламб Г. Гидродинамика. М.-Л.: Гостеиздат, 1947. 928 с.
- 17. Левич В.Г. *Физико-химическая гидродинамика*. М.: ГИТЛ, 1959. 699 с.
- Ионина А.В. Анализ тепловых и диффузионных процессов при ЭПО поверхности электровзрывного легирования // Прикладная физика и математика. 2023. № 5. С. 36–46. – DOI 10.25791/ pfim.05.2023.1276. – EDN KQWNNR.
- Ivanov Yu.F., Glezer A.M., Kuznetsov R.V., Gromov V.E., Shliarova Yu.A., Semin A.P., Sundeev R.V. Fine structure formation in rails under ultra long-term operation // *Materials Letters*. 2022. Vol. 309. P. 131378.
- 20. Ионина А.В., Будовских Е.А., Коновалов С.В. [и др.] Модификация поверхности технически чистого титана ВТ1-0 после различных видов обработки // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2023. Т. 13. № 1. С. 21–31. – DOI 10.21869/2223-1528-2023-13-1-21-31. – EDN QUWOVE.

References

- Sosnin N.A., Ermakov S.A., Topolyansky P.A. *Plazmennye tekhnologii. Svarka, nanesenie pokrytij, uprochnenie* [Plasma technologies. Welding, coating, hardening]. M.: Mechanical engineering. 2008. 406 p.
- Budovskikh E.A., Bagautdinov A.Ya., Vostretsova A.V., Gromov V.E. Zakonomernosti elektrovzryvnogo legirovaniya metallov i splavov [Regularities of electroexplosive alloying of metals and alloys]. *Izvestiya vuzov. Fizika* [Izvestiya vuzov. Physics]. 2008. Vol. 51. No. 5. Pp. 71–83. – EDN IXVYKX.
- 3. Vostrecova A.V., Vashchuk E.S., Budovskih E.A., Karpij S.V., Ivanov Yu.F., Gromov V.E. Osobennosti impul'snoj elektrono-puchkovoj obrabotki poverhnosti elektrovzryvnogo legirovaniya stali 45 i titana [Features of pulsed electron beam surface treatment of electroexplosive alloying of steel 45 and titanium]. *Strukturno-fazovye sostoyaniya perspektivnyh metallicheskih metallov* [Structural and phase states of promising metallic metals].

Ed. V.E. Gromov. Novokuznetsk: NPK Publishing House, 2009. Pp. 28–41.

- 4. Gromov V.E., Yuriev A.B., Morozov K.V., Ivanov Y.F. *Microstructure of quenched rails*. Cambridge, ISP Ltd. 2016. 153 p.
- Ivanov Yu.F., Glezer A.M., Kuznetsov R.V., Gromov V.E., Shliarova Yu.A., Semin A.P., Sundeev R.V. Fine structure formation in rails under ultra long-term operation // *Materials Letters*. 2022. Vol. 309. P. 131378.
- Bauri L.F., Alves L.H.D., Pereira H.B., Tschiptschin A.P., Goldenstein H. The role of welding parameters on the control of the microstructure and mechanical properties of rails welded using FBW // Journal of Materials Research and Technology. 2020. Vol. 9(4). Pp. 8058–8073.
- 7. Ionina A.V. Analiz mikrotverdosti poverhnostnyh sloyov stali posle razlichnyh vidov kombinirovannoj obrabotki [Analysis of microhardness of surface layers of steel after various types of combined sovremennoj processing]. Voprosy nauki: problemy, tendencii i perspektivy: Materialy VIImezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii, priurochennoj k Godu pedagoga i nastavnika, Novokuzneck, 08 dekabrya 2024 goda [Issues of modern science: problems, trends and prospects: Materials of the VII International scientific and practical conference dedicated to the Year of the teacher and mentor, Novokuznetsk, December 08, 2024]. Kemerovo: Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbachev, 2023. Pp. 250-253. EDN PICPVJ.
- Vostrecova A.V., Budovskih E.A., Ivanov Yu.F., 8. Gromov V.E. Formirovanie poverhnostnyh sloev pri elektronno-puchkovoj obrabotke poverhnosti elektrovzryvnogo boroalitirovaniya stali 45 [Formation of surface layers during electron beam surface treatment of electroexplosive boronizing of steel 45]. Aktual'nye problemy prochnosti: Cbornik materialov 50-ogo Mezhdunarodnogo nauchnogo simpoziuma, Vitebsk, 27 sentyabrya – 2010 goda [Actual problems of strength: Collection of materials of the 50th International Scientific Symposium, Vitebsk, September 27, 2010]. Vitebsk: Vitebsk State Technological University, 2010. Pp. 103–104. – EDN UIIGCO.
- Rodrigues K.F., Mourão G.M.M., Faria G.L.F. Kinetics of isothermal phase transformations in premium and standard rail steels // *Steel Res Int.* 2021. Vol. 92(2). P. 2000306.
- Rodrigues K.F., Faria G.L. Characterization and Prediction of Continuous Cooling Transformations in Rail Steels // *Materials Research*. 2021. Vol. 24(5). P. 20200519.
- 11. Ionina A.V., Budovskikh E.A. Osobennosti formirovaniya gradientnyh struktur na poverhnosti titana VT1-0 posle kombinirovannoj obrabotki

[Features of the formation of gradient structures on the surface of titanium VT1-0 after combined treatment]. *Prikladnaya fizika i matematika* [Applied Physics and Mathematics]. 2023. No. 2. Pp. 3–10. – DOI 10.25791/pfim.02.2023.1253. – EDN XVIFDM.

- 12. Vashchuk E.S., Romanov D.A., Ionina A.V., Aksenova K.V. Mikrotverdost' poverhnosti i struktura konstrukcionnoj stali posle obrabotki koncentrirovannym plazmennym potokom i impul'snym elektronnym puchkom [Microhardness of the surface and structure of structural steel after treatment with concentrated plasma flow and pulsed electron beam]. Fundamental'noe i prikladnoe *materialovedenie: Trudy XX Mezhdunarodnoj* nauchnoj shkoly-konferencii, Barnaul, 17 oktyabrya 2023 goda [Fundamental and applied materials science: Proceedings of the XX International Scientific School-conference, Barnaul, October 17, 2023]. Barnaul: Altai State Technical University named after I.I. Polzunov, 2023. Pp. 62-71. - EDN REAJMA.
- 13. Withem J. *Linejnye i nelinejnye volny* [Linear and nonlinear waves]. M.: Mir. 1977. 623 p.
- Vlasov V.P., Zhdanov S.K., Trubnikov B.A. Nelinejnaya teoriya ustojchivosti Kel'vina-Gel'mgol'ca [Nonlinear Kelvin-Helmholtz stability theory]. *Izvestiya AN SSSR. MZHG* [Izvestiya AN SSSR. MZHG]. 1991. No. 3. Pp. 10–16.
- 15. Anishchik V.M., Astashinsky V.M., Kvasov N.T., etc. Neustojchivost' Kel'vina-Gel'mgol'ca pri vzaimodejstvii kompressionnoj plazmy s veshchestvom [Kelvin-Helmholtz instability in the

interaction of compression plasma with matter]. *Fizika i himiya obrabotki materialov* [Physics and Chemistry of materials processing]. 2008. No. 5. Pp. 27–33.

- 16. Lamb G. *Gidrodinamika* [Hydrodynamics]. M.-L.: Gosteizdat, 1947. 928 p.
- 17. Levich V.G. *Fiziko-himicheskaya gidrodinamika* [Physico-chemical hydrodynamics]. M.: GITL, 1959. 699 p.
- Ionina A.V. Analiz teplovyh i diffuzionnyh processov pri EPO poverhnosti elektrovzryvnogo legirovaniya [Analysis of thermal and diffusion processes in the EPO of the surface of electroexplosive alloying]. *Prikladnaya fizika i matematika* [Applied Physics and Mathematics]. 2023. No. 5. Pp. 36–46. – DOI 10.25791/pfim.05.2023.1276. – EDN KQWNNR.
- Ivanov Yu.F., Glezer A.M., Kuznetsov R.V., Gromov V.E., Shliarova Yu.A., Semin A.P., Sundeev R.V. Fine structure formation in rails under ultra long-term operation // *Materials Letters*. 2022. Vol. 309. P. 131378.
- Ionina A.V., Budovskih E.A., Konovalov S.V. [i dr.] Modifikaciya poverhnosti tekhnicheski chistogo titana VT1-0 posle razlichnyh vidov obrabotki [Modification surfaces of technically pure titanium VT1-0 after various types of processing]. *Izvestiya YUgo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta*. *Seriya: Tekhnika i tekhnologii* [Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Series: Engineering and Technology]. 2023. Vol. 13. No. 1. Pp. 21–31. – DOI 10.21869/2223-1528-2023-13-1-21-31. – EDN QUWOVE.

Сведения об авторе

Ионина Анна Валерьевна, канд. техн. наук, заведующий кафедрой технических дисциплин и информационных технологий

Филиал Кузбасского государственного технического университета имени Т.Ф. Горбачева 654006, Российская Федерация, Кемеровская область, Кузбасс, ул. Орджоникидзе, 7

Information about author

Ionina Anna Valeryvna, Cand. of Techn. Sciences, Head of the Department of Technical Disciplines and Information Technologies

Branch of Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbachev

654006, Russian Federation, Kemerovo region, Kuzbass, Ordzhonikidze st., 7