

УДК 621.793.8

Романов Д.А.¹, Молотков С.Г.², Колмакова Т.В.³, Кузив Е.М.¹, Громов В.Е.¹

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕУСТОЙЧИВОСТИ РИХТМАЙЕРА-МЕШКОВА ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА ПОКРЫТИЕ-ПОДЛОЖКА ПРИ ЭЛЕКТРОВЗРЫВНОМ НИКЕЛИРОВАНИИ АЛЮМИНИЯ

В настоящей работе предложена модель образования неустойчивости Рихтмайера-Мешкова на границе раздела двух несжимаемых вязких жидкостей при электровзрывном никелировании алюминия. Установлен ряд характерных особенностей для неустойчивости Рихтмайера-Мешкова, которые обусловлены интенсивностью импульсного воздействия. Развитие неустойчивости начинается с возмущения малой амплитуды, которая первоначально возрастает линейно со временем. Далее неустойчивость приобретает нелинейный характер со смешиванием никеля и алюминия. Показано, что после импульсного воздействия никелевой импульсной плазменной струей на поверхность алюминиевого образца, неустойчивость Рихтмайера-Мешкова переходит в неустойчивость Кельвина-Гельмгольца. Интенсивность импульсного воздействия обуславливает ряд характерных особенностей неустойчивости Рихтмайера-Мешкова. Так в случае достаточно слабого импульса и (или) при малых отклонениях формы контактной границы от формы ударной волны граница раздела газов претерпевает пропорционально малые изменения, линейно изменяющиеся во времени. В этом случае развивается ламинарный режим неустойчивости. А в случае увеличения мощности воздействия даже при малых отклонениях форм контактной границы и ударной волны, возмущение границы становится нелинейным, пространственно неоднородным. В этом случае развивается турбулентный режим неустойчивости. Когда проходит ударная волна, возникающая между двумя контактирующими сплошными средами различной плотности – жидким никелем и жидким алюминием, в том случае, когда поверхность их раздела испытывает ускорение от импульсной плазменной струи из продуктов электрического взрыва никелевой фольги и алюминиевой подложкой возникает неустойчивость Рихтмайера-Мешкова. Увеличение амплитуды колебаний происходит с возрастанием длины волны начальной неоднородности.

Ключевые слова: математическая модель, неустойчивость Рихтмайера-Мешкова, неустойчивость Кельвина-Гельмгольца, электровзрывной синтез, термореагирующие компоненты, алюминий, никель, напряжение, деформация, упрочненный слой.

Romanov D.A.¹, Molotkov S.G.², Kolmakova T.V.³, Kuziv E.M.¹, Gromov V.E.¹

MODELING RICHTMYER-MESHKOV INSTABILITY INTERFACE COATING-SUBSTRATE WITH NICKEL PLATING OF ALUMINUM ELECTROEXPLOSIVE

In this paper we propose a model of formation Richtmyer-Meshkov instability at the interface of two incompressible viscous liquids at electroexplosive nickel plating of aluminum. We set the number of unique features for Richtmyer-Meshkov instability, which are caused by the intensity pulse action. The development of the instability begins with small-amplitude perturbations, which initially increases linearly with time. Further the instability becomes nonlinear character with a mix of nickel and aluminum. It is shown that after exposure to nickel pulse pulsed plasma jet on the aluminum surface of the sample, Richtmyer-Meshkov instability becomes Kelvin-Helmholtz instability. The intensity of the impulse action causes a number of characteristic features of Richtmyer-Meshkov instability. Thus, in the case of a sufficiently weak pulse and (or) for small deviations in the shape of the contact boundary from the shape of the shock wave, the gas interface undergoes proportionally small changes linearly varying with time. In this case, a laminar instability regime develops. And in the case of increasing the impact power even for small deviations of the contact boundary and shock wave shapes, the perturbation of the boundary becomes nonlinear, spatially inhomogeneous. In this case, a turbulent instability regime develops. When a shock wave occurs between two contacting continuous media of different densities, liquid nickel and liquid aluminum, when the interface of them undergoes acceleration from a pulsed plasma jet from products of an electric explosion of a nickel foil and an aluminum substrate, the Richtmyer-Meshkov instability arises. An increase in the amplitude of the oscillations occurs with an increase in the wavelength of the initial inhomogeneity.

Keywords: mathematical model, Richtmyer-Meshkov instability, Kelvin-Helmholtz instability, electroexplosive synthesis, termoreaction components, aluminum, nickel, stress, strain, hardened layer.

Введение

Экспериментально и теоретически [1-7] показано, что при достаточно интенсивном импульсном ускорении контактной границы (контактного разрыва) двух различных газов или жидкостей форма этой границы может претерпевать существенные изменения, если она не совпадает с формой ударной волны. Эти расчеты не учитывали вязкость соприкасающихся сред. Учет вязкости одним из первых был проведен в [8].

Для неустойчивости Рихтмайера-Мешкова характерен ряд особенностей, которые обусловлены интенсивностью импульсного воздействия. При достаточно слабом импульсе и (или) при малых отклонениях формы контактной границы от формы ударной волны граница раздела газов претерпевает пропорционально малые изменения, линейно изменяющиеся во времени (ламинарный режим развития неустойчивости). При увеличении мощности воздействия даже при малых отклонениях форм контактной границы и ударной волны, возмущение границы становится нелинейным, пространственно неоднородным и переходит в турбулентный режим развития.

Цель настоящей работы заключалась в построении модели образования слабой нелинейной неустойчивости Рихтмайера-Мешкова на границе раздела двух несжимаемых вязких

жидкостей при электровзрывном никелировании алюминия.

1. Постановка задачи и ее решение

Жидкость, имеющая плотность ρ_2 , динамическую вязкость μ_2 , заполняет полуплоскость $\{-\infty < x < \infty, z \geq 0\}$. Другая жидкость имеет характеристики ρ_1, μ_1 , заполняет полуплоскость $\{-\infty < x < \infty, z \leq 0\}$.

В начальный момент границу жидкостей представим в виде

$$z = x(x, t) = x_0 \cdot \cos(kx), \quad t = 0. \quad (1)$$

Ось ox представляет собой границу перед импульсным воздействием (рис.1).

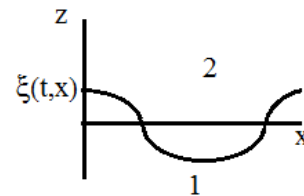


Рис.1. Положение границы раздела перед импульсным воздействием

Импульсное ускорение определим как $g(t) = G \cdot \delta(t)$, направленное вдоль оси z .

Перейдем к безразмерным величинам по формулам, предложенным в [6]:

$$\begin{aligned} x' &\rightarrow x \cdot k, & z' &\rightarrow z \cdot k, & t' &\rightarrow t \cdot G \cdot k, & x' &\rightarrow \frac{x}{x_0}, \\ u^{(i)'} &= \frac{u^{(i)}}{G}, & w^{(i)'} &= \frac{w^{(i)}}{G}, & P^{(i)'} &= \frac{P^{(i)}}{(r_1 + r_2) \cdot G^2}, \end{aligned} \quad (2)$$

где x', z', t' – безразмерные координаты и время, $u^{(i)'}$, $w^{(i)'}$, $P^{(i)'}$ – безразмерные скорости и давление.

Запишем условие несжимаемости и уравнения Навье-Стокса в безразмерной форме (3), штрихи у безразмерных величин опускаем:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u^{(i)}}{\partial x} + \frac{\partial w^{(i)}}{\partial z} &= 0, \\ \frac{\partial u^{(i)}}{\partial t} + u^{(i)} \frac{\partial u^{(i)}}{\partial x} + w^{(i)} \frac{\partial u^{(i)}}{\partial z} &= -B^{(i)} \cdot \frac{\partial P^{(i)}}{\partial x} + C^{(i)} \cdot \left(\frac{\partial^2 u^{(i)}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w^{(i)}}{\partial x^2} \right), \\ \frac{\partial w^{(i)}}{\partial t} + w^{(i)} \frac{\partial w^{(i)}}{\partial x} + u^{(i)} \frac{\partial w^{(i)}}{\partial z} &= -B^{(i)} \cdot \frac{\partial P^{(i)}}{\partial x} + C^{(i)} \cdot \left(\frac{\partial^2 u^{(i)}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w^{(i)}}{\partial x^2} \right) - d(t), \\ B^{(i)} &= \frac{r^{(1)} + r^{(2)}}{r^{(i)}}, & C^{(i)} &= \frac{k \cdot m^{(i)}}{G \cdot r^{(i)}}, & i &= 1, 2. \end{aligned} \quad (3)$$

Граничные условия на поверхности раздела ($z' = kx_0x'$) имеют вид (4), штрихи у безраз-

мерных величин опускаем:

$$\begin{aligned} u^{(1)} &= u^{(2)}, & w^{(1)} &= w^{(2)}, \\ m^{(1)} \left(\frac{\partial u^{(1)}}{\partial z} + \frac{\partial w^{(1)}}{\partial x} \right) &= m^{(2)} \left(\frac{\partial u^{(2)}}{\partial z} + \frac{\partial w^{(2)}}{\partial x} \right) \\ P^{(1)} - 2C^{(1)} B^{(1)} \frac{\partial w^{(1)}}{\partial z} &= P^{(2)} - 2C^{(2)} B^{(2)} \frac{\partial w^{(2)}}{\partial z}, \\ \frac{\partial x}{\partial t} + \frac{\partial x}{\partial x} u^{(1)} - \frac{\partial w^{(1)}}{k \cdot x_0} &= 0, & \frac{\partial x}{\partial t} + \frac{\partial x}{\partial x} u^{(2)} - \frac{\partial w^{(2)}}{k \cdot x_0} &= 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Условие малости начальных возмущений $\varepsilon = k \cdot \xi_0 \ll 1$, таким образом, в безразмерных переменных толщина возмущенной границы z' имеет тот же порядок. В [9] предложен метод асимптотического разложения по параметру ε , причем вдали от границы решение системы получается при $\varepsilon \rightarrow 0$ для фиксированных z' и x' , а в области возмущенной границы раздела слоев при $\varepsilon \rightarrow 0$, для фиксированных z'/ε и x' . Введем число Рейнольдса $Re^{(i)} = 1/C^{(i)}$. Для учета вязких эффектов в области возмущенной границы раздела в [9] предложено взять $Re^{(i)} = O(\varepsilon^{-2})$, так как для больших значений

$Re^{(i)}$, пограничный слой меньше деформации возмущенной границы и кривизна поверхности раздела можно пренебречь при расчете вязких эффектов. А при меньших значениях $Re^{(i)}$, наоборот, система в этом утолщенном пограничном слое вырождается, будучи не в состоянии обеспечить непрерывность вязких напряжений в масштабе возмущенной границы. Поэтому число Рейнольдса должно быть достаточно большим, что и происходит в нашем случае.

Деформацию границы раздела предложено искать в безразмерном виде:

$$x'(x', t') = (1 + At') \cos(x') - e \frac{8A}{3\sqrt{p}} t'^{\frac{3}{2}} \cos(x') - e \frac{A^3 t'^2}{2} \cos(2x'), \quad A = \frac{r^{(1)} - r^{(2)}}{r^{(1)} + r^{(2)}}. \quad (5)$$

Первое слагаемое в сумме это обычный рост возмущения границы в линейной модели, второе слагаемое представляет собой вязкое затухание этого роста; третье слагаемое является

нелинейным взаимодействием возмущения с самим собой.

В размерных переменных уравнение (5) принимает вид:

$$\frac{x(t, x)}{x_0} = \left(1 + AGkt - \frac{16AGk^2 t^{\frac{3}{2}}}{3\sqrt{p}} \frac{\sqrt{r^{(1)} r^{(2)} m^{(1)} m^{(2)}}}{(r^{(1)} + r^{(2)}) (\sqrt{r^{(1)} m^{(1)}} + \sqrt{r^{(2)} m^{(2)}})} \right) \cos(kx) - \frac{x_0 A^3 G^2 k^3 t^2}{2} \cos(2kx). \quad (6)$$

Для жидкого никеля $\mu^{(2)} = 4,9 \cdot 10^{-3}$ Па·с, $\rho^{(2)} = 8,9 \cdot 10^3$ кг/м³, и для жидкого алюминия $\mu^{(1)} = 1,3 \cdot 10^{-3}$ Па·с, $\rho^{(1)} = 2,7 \cdot 10^3$ кг/м³ [10]. В результате расчета по формуле (6) построим график зависимости изменения относительной амплитуды колебаний границы раздела жидкий никель – жидкий алюминий от длины волны начального возмущения при $G = 100$. На рис.2 представлен этот график для двух значений времени после окончания импульса ускорения.

Из рисунка видно, что увеличение амплитуды колебаний происходит с возрастанием длины волны начальной неоднородности. Другими словами, вследствие неустойчивости Рихтмайера-Мешкова наибольшее развитие получают более длинноволновые возмущения. Однако, нужно заметить, что учет поверхностного натяжения может подавлять коротковолновые возмущения, хотя в некоторых случаях изменение величины G может исключить это влияние [11-15].

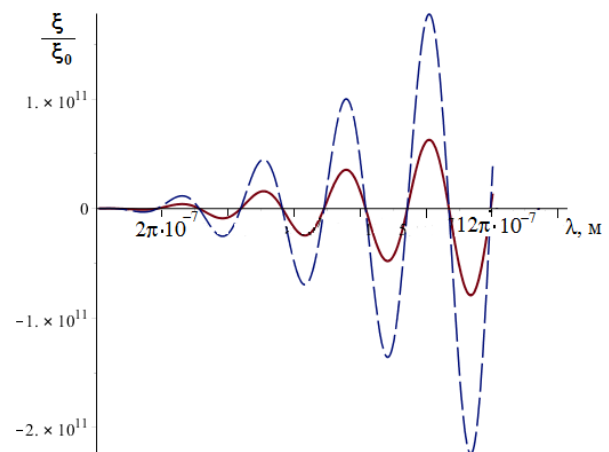


Рис.2. Зависимость изменения относительной амплитуды колебаний границы раздела жидкий никель – жидкий алюминий от длины волны начального возмущения при $G = 100$, сплошная линия – $t = 0,5 \cdot 10^{-4}$ с, пунктир – $t = 1,5 \cdot 10^{-4}$ с после окончания импульса ускорения

Заключение

При прохождении ударной волны возникающей между двумя контактирующими сплошными средами различной плотности – жидким никелем и жидким алюминием, когда поверхность их раздела испытывает ускорение от импульсной плазменной струи из продуктов электрического взрыва никелевой фольги и алюминиевой подложкой возникает неустойчивость Рихтмайера-Мешкова. Увеличение амплитуды колебаний происходит с возрастанием длины волны начальной неоднородности. Неустойчивость Рихтмайера-Мешкова на границе раздела никель-алюминий является предельным случаем неустойчивости Рэлея-Тейлора, когда постоянное воздействие силы заменяется на краткий импульс.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 16-32-60032 мол_а_дк, 16-32-50133 мол_нр и Грантом Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук МК-1118.2017.2, госзадания Минобрнауки № 2708 на выполнение научно-исследовательской работы.

Список используемой литературы

1. Мешков Е.Е. Неустойчивость границы раздела двух газов, ускоряемой ударной волной // Известия Академии Наук СССР, Механика жидкостей и газов. 1969. в.5. С. 151-158.
2. Richtmyer R.D. // Commun. Pure Appl. Math. 1960. V.13. P. 287.
3. Velikovich A.L. // Phys. Fluids. 1996. V.8. No.6. P. 1666.
4. Алёшин А.Н., Демченко В.В., Зайцев С.Г., Лазарева Е.В. Взаимодействие ударного фронта с волнообразным контактным разрывом // Известия Академии Наук. Механика жидкостей и газов. 1992. в.5. С. 168-178.
5. Richtmyer R.D. Taylor instability in shock acceleration of compressible fluids // Comm. Pure and Appl. Math. 1960. V.13. P. 297-319.
6. Popinet S., Zaleski S. A front-tracking algorithm for accurate representation of surface tension // Int. J. Numer. Methods Fluids. 1999. V.30. P. 775-793.

7. Jacobs J.W., Sheeley J.M. Experimental study of incompressible Richtmyer-Meshkov instability // Phys. Fluids. 1996. V.8. No.2. P. 405-415.
8. Mikaelian K.O. // Phys. Rev. E. 1993. V.47. No.1. P. 375.
9. Kevorkian J., Cole J.D. Perturbation methods in applied mathematics. Springer-Verlag, 1981. 545 p.
10. Смитлз К.Дж. Металлы. Справочник. М.: Металлургия, 1980. 446 с.
11. Carlès P., Popinet S. The effect of viscosity, surface tension and non-linearity on Richtmyer-Meshkov instability // European Journal of Mechanics B/Fluids. 2002. V.21. P. 511-526.
12. Ракитин Р.Ю., Полетаев Г.М., Аксенов М.С., Старостенков М.Д. Механизмы диффузии по границам зерен в двумерных металлах // Письма в Журнал технической физики. 2005. т.31. №15. С. 44-48.
13. Андрухова О.В., Козлов Э.В., Дмитриев С.В., Старостенков М.Д. О возможных механизмах атомного разупорядочения в бинарных сплавах // Физика твердого тела. 1997. т.39. №8. С. 1456-1460.
14. Старостенков М.Д. Кристаллогеометрическое описание планарных дефектов в сверхструктурах: автореф. ... д-ра физ.-мат. наук. Барнаул, 1994. 85 с.
15. Dem'yanov B.F., Kustov S.L., Starostenkov M.D. Computer simulation of the interaction of vacancies with the special tilt grain boundaries // Materials Science and Engineering: A. 2004. V.387-389. No.1-2 Spec. Iss. P. 738-742.

¹Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия.

²Новокузнецкий институт (филиал) Кемеровского государственного университета, Новокузнецк, Россия.

³Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия.

Подписано в печать 24.05.17.

Сведения об авторах

Романов Денис Анатольевич, к.т.н., доц. СибГИУ, romanov_da@physics.sibsib.ru
 Молотков Сергей Григорьевич, доц. НИ (филиал) КемГУ, sgmol@yandex.ru
 Колмакова Татьяна Витальевна, д.ф.-м.н., профессор НИ ТГУ, kolmakova@ftf.tsu.ru
 Кузив Елена Михайловна, к.т.н., доцент СибГИУ, ElenaKuziv@yandex.ru
 Громов Виктор Евгеньевич, д.ф.-м.н., профессор, зав. кафедрой СибГИУ, gromov@physics.sibsib.ru