



СИЛОВОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА СВАРИВАЕМЫЕ ПОВЕРХНОСТИ, ИНИЦИИРОВАННОЕ ПРОТЕКАНИЕМ РЕАКЦИИ СВС В НАНОСЛОЙНОЙ ПРОСЛОЙКЕ

Е. А. ВЕЛИКОИВАНЕНКО, канд. физ.-мат. наук, А. И. УСТИНОВ, д-р физ.-мат. наук,
 Г. К. ХАРЧЕНКО, д-р техн. наук, Ю. В. ФАЛЬЧЕНКО, канд. техн. наук,
 Л. В. ПЕТРУШИНЕЦ, Г. Ф. РОЗЫНКА, инженеры (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

На примере сварки образцов алюминидов титана через промежуточную прослойку Ti/Al с нанослойной структурой рассчитаны напряжения, возникающие в поверхностных слоях свариваемых образцов интерметаллида, инициированные интенсивным тепловыделением при прохождении в прослойке реакции самораспространяющегося высокотемпературного синтеза.

Ключевые слова: сварка, нанослойная прослойка, реакция самораспространяющегося высокотемпературного синтеза, термические напряжения

В работах [1, 2] показано, что применение в качестве промежуточных прослоек нанослойных фольг на основе интерметаллидообразующих элементов значительно улучшает условия, необходимые для формирования неразъемных соединений в твердой фазе, — снижаются температура нагрева, время выдержки и давление, прилагаемое при получении соединения. При анализе диффузионной зоны сварного соединения на основе алюминидов титана установлено, что ее размер возрастает в 4 раза по сравнению с диффузионной зоной, полученной при сварке интерметаллида без прослойки при тех же условиях.

Известно, что в процессе нагрева в промежуточной прослойке может быть инициирована реакция самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС), которая сопровождается интенсивным тепловыделением. Реакция СВС, например, в фольгах Ti/Al в зависимости от начальной температуры, толщины слоев и их количества происходит в режиме безгазового горения или теплового взрыва [3, 4]. Скорость горения достигает 150 см/с при температуре 1100...1300 °С. Интенсивность тепловыделения при протекании реакции СВС, например в фольгах Ni/Al, может составлять 4 Вт/м². Такое импульсное тепловое воздействие на поверхностные слои свариваемых материалов, кроме локального повышения температуры, может вызывать в них появление упругих напряжений, которые также оказывают влияние на процессы массопереноса подобно тому, как это имеет место при ударных воздействиях на свариваемые поверхности [5, 6].

В связи с этим в настоящей работе на примере алюминидов титана γ-TiAl проведена оценка уровня напряжений, которые возникают в поверхностных слоях образцов, соединяемых через промежуточную прослойку, при инициировании в ней реакции СВС.

Математические расчеты выполнены для начального периода сварки, когда в процессе нагрева температура пластин достигает уровня температуры запуска реакции СВС при следующих условиях: размеры свариваемых образцов алюминидов титана 10×10×5 мм; толщина фольги 20 мкм; скорость предварительного подогрева 20 °С/мин; давление при предварительном поджатии 8 МПа; температура запуска реакции СВС 400 °С; температура на фронте «горения» фольги 1200 °С; прохождение реакции СВС одновременно по всей поверхности нанослойной фольги; время ее прохождения 2·10⁻⁵ с.

Ввиду небольшого размера свариваемых образцов и их равномерного нагрева по толщине рассматривалась плоская задача. Фольгу моделировали в виде зазора δ₃ между пластинами.

Для анализа напряженно-деформационного состояния в рассматриваемых пластинах длиной L_x, высотой L_y и толщиной δ (рис. 1) в процессе сварочного нагрева сначала определяли температурное поле T(x, y, t) во времени

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) = c\gamma \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (1)$$

где λ — коэффициент теплопроводности материала пластин; cγ — коэффициент объемной теплоемкости материала пластин; t — время нагрева.

Затем решали задачу по определению кинетики напряжений и деформаций. При этом использовали методы последовательного прослежи-



вания во времени с шагом Δt и конечных элементов по пространству, т. е. данная область разбивалась с шагом h_x и h_y и представлялась совокупностью прямоугольных элементов размером $h_x \times h_y$.

На каждом шаге прослеживания (в каждый момент времени t) решение находится с учетом полученного на предыдущем шаге $t - \Delta t$. Температура в узлах сетки конечно-элементной разбивки в момент времени t определяется решением системы алгебраических уравнений, полученных в результате минимизации функционала \mathcal{E}_T по температуре в узлах элементов [7]:

$$\mathcal{E}_T = -\frac{1}{2} \int_S \left[\lambda_x \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \lambda_y \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 + \frac{c_T}{\Delta t} (T - T_*)^2 \right] dx dy + \frac{1}{2} \int_{\Gamma} \beta_n (T - T_c)^2 d\Gamma; \quad (2)$$

$$\frac{\partial \mathcal{E}_T}{\partial T_{mn}} = 0, \quad m = 1, 2, \dots,$$

$n = 1, 2, \dots$ — нумерация узлов в направлении x, y ,

где $T_* = T(x, y, t - \Delta t)$ — уже известная температура в момент времени $t - \Delta t$ начиная с начальной ($t = 0$); S — рассматриваемая область; Γ — наружные границы изделия; β_n — коэффициент теплообмена с окружающей средой с температурой T_c .

Производные $\partial T / \partial x, \partial T / \partial y$ выражаются для каждого прямоугольного элемента через температуру в узлах. Соответственно интеграл по области S заменяется суммой интегралов по конечным элементам области ΔS . Аналогично поступают и с интегралом по поверхности Γ .

Рассмотрим алгоритм решения механической задачи на этапе нагружения, соответствующем моменту времени t , полагая, что при $t_* = t - \Delta t$ решение полностью известно относительно тензоров напряжений σ_{ij} , деформаций ε_{ij} и перемещений U_i в рамках описанного выше плоского напряженного состояния.

Для этого проинтегрируем выражение (2) по времени в пределах от $t - \Delta t$ до t

$$\Delta \varepsilon_{ij} = \left\{ \frac{\sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma}{2G} + \delta_{ij} [K\sigma + \alpha_T(T - T_0)] \right\}_t - \left\{ \frac{\sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma}{2G} + \delta_{ij} [K\sigma + \alpha_T(T - T_0)] \right\}_{t - \Delta t} + \Delta \lambda (\overline{\sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma}), \quad (3)$$

где $\delta_{ij} \sigma$ — шаровый тензор (здесь σ — среднее давление в точке; δ_{ij} — единичная функция); G — модуль сдвига; K — модуль объемного сжатия, равный $(1 - 2\nu)/E$; ν — коэффициент Пуассона;

E — модуль Юнга; α_T — коэффициент термического линейного расширения (КТЛР); T_0 — начальная температура; $\overline{\sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma}$ — среднее значение $\sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma$ в интервале от $t - \Delta t$ до t , вычисленное на основе среднего значения определенного интеграла.

Если значение Δt небольшое, то вполне можно заменить значение $\overline{\sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma}$ искомым значением в момент времени t . Тогда вместо (3) для плоского напряженного состояния получим

$$\begin{aligned} \Delta \varepsilon_{xx} &= B_1 \sigma_{xx} + B_2 \sigma_{yy} - b_{xx}; \\ \Delta \varepsilon_{yy} &= B_1 \sigma_{yy} + B_2 \sigma_{xx} - b_{yy}; \\ \Delta \varepsilon_{xy} &= \psi \sigma_{xy} - b_{xy}, \end{aligned} \quad (4)$$

где σ_{xx}, σ_{yy} — нормальные напряжения; σ_{xy} — касательные напряжения;

$$B_1 = \frac{2\psi + K}{3}; \quad B_2 = \frac{K - \psi}{3}; \quad \psi = \frac{1}{2G} + \Delta \lambda;$$

$$b_{ij} = \left(\frac{\sigma_{ij}}{2G} \right)_{t - \Delta t} + \delta_{ij} \left[\sigma \left(K - \frac{1}{2G} \right) \right]_{t - \Delta t};$$

$$\delta_{ij} \Delta \varphi, \quad i, j = x, y; \quad \Delta \varphi = [\alpha_T T - T_0]_t - [\alpha_T (T - T_0)]_{t - \Delta t}$$

где φ — функция температурного удлинения.

Отсюда видно, что b_{ij} определяется решением на момент времени $t - \Delta t$ и известным значением $\Delta \varphi$. Нелинейность, связанная с условием текучести, находится в функции ψ состояния материала в элементарном объеме в момент времени t .

Допустим, что значение $\psi(x, y, t)$ известно. Решив (4) относительно напряжений, получим

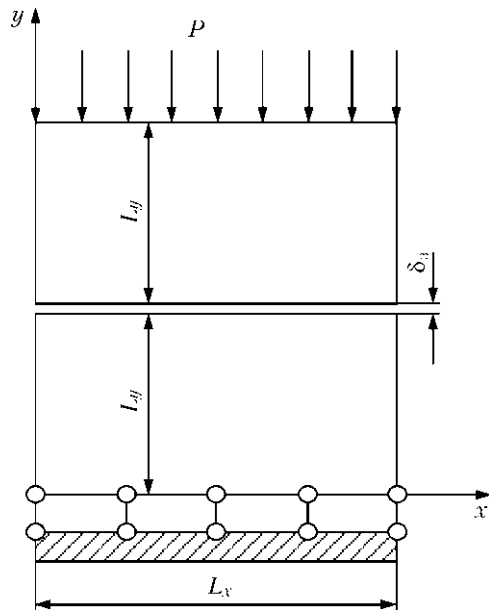


Рис. 1. Расчетная схема сварного соединения



$$\begin{aligned} \sigma_{xx} &= A_1 \Delta \varepsilon_{xx} + A_2 \Delta \varepsilon_{yy} + Y_{xx}; \\ \sigma_{yy} &= A_1 \Delta \varepsilon_{yy} + A_2 \Delta \varepsilon_{xx} + Y_{yy}; \\ \sigma_{xy} &= \frac{1}{\psi} \Delta \varepsilon_{xy} + Y_{xy}; \\ \sigma_{zz} &= \sigma_{xz} = \sigma_{yz} = 0, \end{aligned} \quad (5)$$

где $A_1 = \frac{2\psi + K}{\psi(\psi + 2K)}$; $A_2 = \frac{\psi - K}{\psi(\psi + 2K)}$; $Y_{xx} = A_1 b_{xx} + A_2 b_{yy}$; $Y_{yy} = A_1 b_{yy} + A_2 b_{xx}$; $Y_{xy} = b_{xy}/\psi$.

Соотношения между приращением деформации $\Delta \varepsilon_{ij}$ и компонентами вектора приращения перемещения ΔU_i можно представить в виде

$$\begin{aligned} \Delta \varepsilon_{xx} &= \frac{\partial \Delta U_x}{\partial x}; \\ \Delta \varepsilon_{yy} &= \frac{\partial \Delta U_y}{\partial y}; \\ \Delta \varepsilon_{xy} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \Delta U_y}{\partial x} + \frac{\partial \Delta U_x}{\partial y} \right). \end{aligned} \quad (6)$$

Уравнение совместности деформаций имеет вид

$$\frac{\partial^2 \Delta \varepsilon_{xx}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Delta \varepsilon_{yy}}{\partial x^2} = 2 \frac{\partial^2 \Delta \varepsilon_{xy}}{\partial x \partial y}. \quad (7)$$

Уравнения равновесия можно представить как

$$\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} = 0; \quad \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} = 0. \quad (8)$$

Условия на контуре пластины в точке с нормалью n , т. е. на участке границы, где приложены усилия Γ_p , находим из выражений

$$\begin{aligned} \sigma_{xx} \cos(n, x) + \sigma_{xy} \cos(n, y) &= P_x; \\ \sigma_{xy} \cos(n, x) + \sigma_{yy} \cos(n, y) &= P_y \end{aligned} \quad (9)$$

где P_x, P_y — проекции приложения усилий на осях x и y .

На участке границы, где заданы смешанные граничные условия Γ_u

$$\Delta U_x = \Delta U_x^0; \quad \Delta U_y = \Delta U_y^0. \quad (10)$$

Смешанные условия на части контура Γ_{Pu} получаются путем соответствующего сочетания условий (9) и (10). При известном значении $\psi(x, y, t)$ уравнения (5) – (10) полностью определяют дифференциальную формулировку краевой задачи по вычислению $\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}, U_i$.

Рассмотрим вариационную формулировку этой задачи, что важно при реализации решения методом конечных элементов. Для этого используем функционал

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_1 &= -\frac{1}{2} \int_S \{ (\sigma_{xx} + Y_{xx}) \Delta \varepsilon_{xx} + (\sigma_{yy} + Y_{yy}) \Delta \varepsilon_{yy} + \\ &+ 2(\sigma_{xy} + Y_{xy}) \Delta \varepsilon_{xy} \} dx dy + \int_{\Gamma} P_i \Delta U_i d\Gamma. \end{aligned} \quad (11)$$

Из работ [7, 8] следует, что абсолютный минимум \mathcal{E}_1 для кинематически возможных $\Delta \varepsilon_{ij}$ отвечает действительному распределению приращений деформаций $\Delta \varepsilon_{ij}$ и соответствующим им приращениям ΔU_i , которые являются решением краевой задачи (5) – (10).

С учетом выражения (11) интеграл по области S заменяется суммой интегралов по конечным элементам ΔS , деформации $\Delta \varepsilon_{ij}$ выражаются через ΔU_i , а напряжения σ_{ij} — через $\Delta \varepsilon_{ij}$. Производные в (6) для каждого ΔS выражаются через ΔU_i в узловых точках. Аналогично поступаем и с интегралом по Γ . Таким образом, функционал \mathcal{E}_1 будет представлен квадратичной формой через известные величины ΔU_x и ΔU_y в узлах сетки.

Минимизация $\partial \mathcal{E}_1 / \partial \Delta U_x = 0, \partial \mathcal{E}_1 / \partial \Delta U_y = 0$ дает систему линейных относительно ΔU_i (при известной функции ψ) алгебраических уравнений.

Определив ΔU_i , вычисляем $\Delta \varepsilon_{ij}$ и σ_{ij} . По полученным значениям σ_{ij} уточняется функция ψ . Для этих целей возможны различные итерационные процессы, из которых достаточно эффективным является процесс, описанный в работах [7, 8].

Для проведения расчетов упругопластических напряжений, возникающих в образцах из алюминид титана γ -TiAl в момент прохождения реакции СВС в нанослойной фольге, использовали теплофизические и механические характеристики алюминид титана, приведенные ниже:

коэффициент теплопроводности материала пластин λ , Дж/(м ³ ·К) [9]	0,25
коэффициент объемной теплоемкости материала пластин c_v , Дж/(м ³ ·К) [9]	0,8
предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа [10]	510
модуль Юнга E , МПа [11]	$1,2 \cdot 10^5$
КТЛР α , °С ⁻¹ [12]	$10,8 \cdot 10^{-6}$

Коэффициенты λ и c_v для алюминид титана брались средними от значений данных величин для титана и алюминия. Характер изменения напряженного состояния и уровень микродеформаций поверхностного слоя соединяемых материалов при прохождении реакции СВС в нанослойной фольге показан на рис. 2, из которого видно, что при резком повышении температуры в стыке до 1200 °С происходит скачок сжимающих напряжений ($\sigma_{xx} = 204$ МПа). Они сменяются растягивающими, которые за 0,3 с достигают 575 МПа. Протекание реакции СВС также приводит к повышению напряжений σ_{yy} с 8 до 18 МПа, что более чем в 2 раза превышает значение давления предварительного поджатия. Рас-

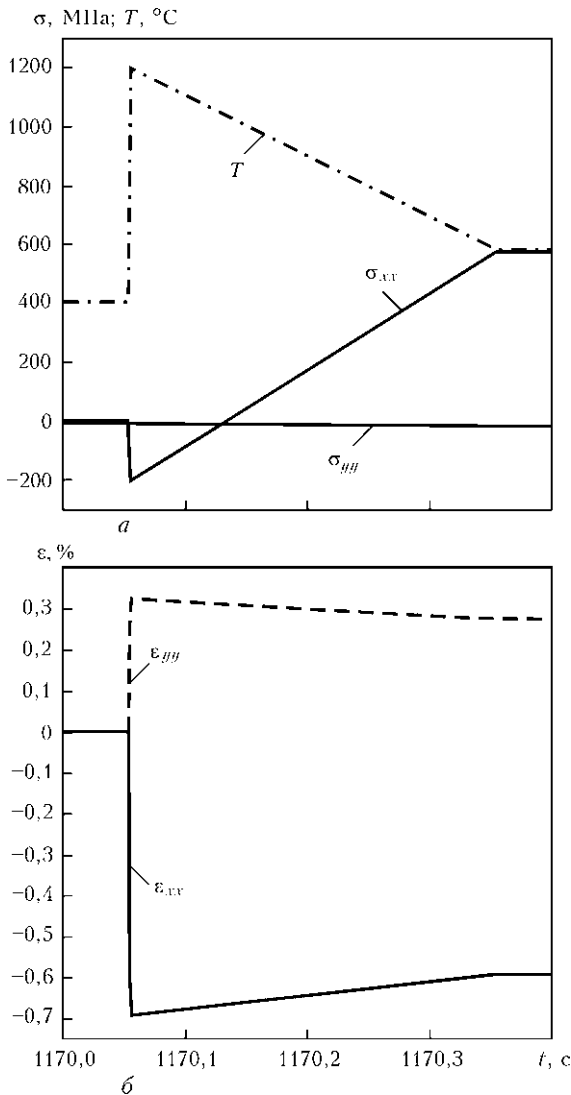


Рис. 2. Кривые напряжений σ_{xx} и σ_{yy} (а), деформаций ϵ_{xx} и ϵ_{yy} (б) в приконтактных объемах свариваемых пластин при прохождении реакции СВС

четные значения микродеформаций приконтактного поверхностного слоя ($\delta \sim 20$ мкм) составляют не более 0,7 % (рис. 2, б).

Таким образом, полученные результаты расчета свидетельствуют о том, что протекание реакции СВС в промежуточной прослойке приводит к значительному по интенсивности динамическому деформационному воздействию на свариваемые

поверхности. Термический «удар» наряду с локальным повышением температуры активизирует диффузионные процессы в поверхностных слоях свариваемых материалов и обеспечивает условия для формирования неразъемных соединений трудносвариваемых материалов.

1. *Получение неразъемных соединений сплавов на основе γ -TiAl с использованием нанослойной прослойки Ti/Al способом диффузионной сварки в вакууме* / А. И. Устинов, Ю. В. Фальченко, А. Я. Ищенко и др. // Автомат. сварка. — 2009. — № 1. — С. 17–21.
2. *Дослідження дифузійних процесів у зварних з'єднаннях алюмініду титану (TiAl)* / Г. К. Харченко, В. Ф. Мазанко, А. І. Устинов та ін. // Вісн. ЧДТУ. Сер. Технічні науки. — 2009. — № 37. — С. 117–119.
3. *Елкина Н. А., Носырев А. Н., Хвестюк В. И.* Исследование процессов получения фольг интерметаллидов TiAl из многослойных бинарных систем методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза // Материалы XXXIII Междунар. конф. по физике плазмы и УТС, Звенигород, 13–17 февр. 2006 г. — www.fpl.gpi.ru/Zvenigorod/XXXIII/Pt/ru/BL-Khvesyuk.doc.
4. *Безгазовое горение многослойных биметаллических нанопленок Ti/Al* / А. С. Рогачев, А. Э. Григорян, Е. В. Илларионова и др. // Физ. горения и взрыва. — 2004. — 40, № 2. — С. 45–51.
5. *Мешков Ю. Я., Герцирикен Д. С., Мазанко В. Ф.* К вопросу о механизме ускоренного массопереноса в металлах в условиях импульсных нагрузжений // Металлофиз. — 1996. — 18, № 4. — С. 52–53.
6. *Массоперенос в металлах при низких температурах в условиях внешних воздействий* / Д. С. Герцирикен, В. Ф. Мазанко, В. М. Тышкевич, В. М. Фальченко. — Киев: Изд. ИМФ НАНУ, 1999. — 436 с.
7. *Махненко В. И.* Расчетные методы исследования кинетики сварочных напряжений и деформаций. — Киев: Наук. думка, 1976. — 320 с.
8. *Numerical methods of the predictions of welding stresses and distortions* / V. I. Makhnenko, E. A. Velikoivanenko, V. E. Pochinok et al. / Ed. B. E. Paton. — Harwood: Harwood acad. publ., 2001. — 147 p. — (Welding and Surfacing Rev., vol. 13, pt. 1).
9. *Физические свойства сталей и сплавов, применяемых в энергетике: Справ.* / Под ред. Б. Е. Неймарка. — М.: Л.: Энергия, 1967. — 240 с.
10. *Полькин И. С., Колачев Б. А., Ильин А. А.* Алюминиды титана и сплавы на их основе // Технология легких сплавов. — 1997. — № 3. — С. 32–39.
11. *Исследование методом автоматического индентирования соединений алюминиды титана с титановым сплавом BT8* / В. Ф. Горбань, Г. К. Харченко, Ю. В. Фальченко и др. // Автомат. сварка. — 2009. — № 12. — С. 20–23.
12. *The use of cast Ti-48Al-2Cr-2Nb in jet engines* / P. Bartolotta, J. Barrett, T. Kelly, R. Smashey // J. of the Minerals, Metals and Materials Soc. — 1997. — 49, № 5. — P. 48–50.

The case of welding samples of titanium aluminide through nanostructured Ti/Al interlayer was used to calculate stresses arising in the surface layers of welded intermetallide samples, initiated by intensive heat evolution at running of the reaction of self-propagating high-temperature synthesis in the interlayer.

Поступила в редакцию 28.02.2010,
в окончательном варианте 17.02.2011