

# Базовые принципы барроэлектрического синтеза металл-интерметаллидного ламината $Ti-Al_3Ti$ из пакета фольги $Al-Ti$

Н. А. Васянович, В. Н. Цуркин

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,  
пр. Октябрьский, 43-А, г. Николаев, 54018, Украина, e-mail: [dpta@ipt.com.ua](mailto:dpta@ipt.com.ua)*

Предложена процедура расчета базовых параметров барроэлектрической обработки многослойного пакета  $Al-Al_3Ti-Ti$  при синтезе монолитного металл-интерметаллидного ламината  $Ti-Al_3Ti$  из набора фольги  $Al-Ti$ . Показаны условия нагружения, при которых обеспечивается существенное снижение времени обработки по сравнению с горячим изостатическим прессованием.

*Ключевые слова: многослойная фольговая система, металл-интерметаллидный ламинат, электрический ток, диффузия, твердофазный синтез.*

УДК 621.78.013.8:54-19

## ВВЕДЕНИЕ

Металл-интерметаллидные ламинаты (МИЛ) относятся к классу функциональных материалов, обладающих свойствами, которые прежде всего позволяют их выделить как противоударные и термостойкие [1–10], что обеспечивается формированием ламината в виде чередующихся слоев пластичного металла и твердого, прочного в отношении сжатия интерметаллида. Чаще всего для изготовления МИЛ используют заготовки из чистых металлов  $Al$  и  $Ti$  (или сплавов на их основе), как правило, в виде фольги. Их толщины подбирают так, чтобы для синтеза интерметаллида  $Al_3Ti$  слои алюминия растворились полностью, а оставшиеся слои титана служили бы не только прослойкой, но и выполняли бы свою служебную функцию в ламинате  $Ti-Al_3Ti$  в зависимости от назначения этого материала. Здесь логично обеспечить чередование фольги так, чтобы фольга  $Ti$  располагалась по боковым поверхностям объекта обработки с тем, чтобы пластичный  $Ti$  осуществлял надежное пакетирование ламината при его эксплуатации, но толщину фольги для ламината, очевидно, нужно подбирать с учетом его функционального назначения.

В методах, используемых для изготовления ламината, применяют разные технологические способы обработки. Так, активно развиваются многостадийные способы, при которых, вначале используя энергию взрыва, металлы сваривают в пакет, затем отжигают для образования интерметаллидов и прокатывают до необходимой толщины листа [4]. Также ламинат получают путем многократной прокатки с последующим отжигом слоистого пакета [5] и методом искрового плазменного синтеза [3, 6]. В США изобретен и раз-

вивается способ, при котором пакет фольги прессуют под давлением в несколько мегапаскалей, переводя  $Al$  фольги в состояние ползучести, что, как известно, ускоряет процессы диффузионного переноса, и производят ступенчатый отжиг длительностью не менее 10 часов [1, 7]. Аналогичные исследования активно ведутся в Китае [8, 9] и Японии [10]. Но во всех способах в основе всегда лежат два физических принципа воздействия: сжатие и нагрев с помощью внешнего по отношению к объекту обработки источника. Такой физический принцип обработки можно классифицировать как барротермический.

К основным недостаткам перечисленных методов можно отнести обработку в несколько стадий и относительно протяженный период цикла синтеза ламината. Кроме того, можно отметить, что в некоторых методах реакция синтеза  $Al_3Ti$  проводится в температурном интервале жидкого состояния  $Al$  [1]. Но в этом случае риск протекания жидкой фазы из пакета заставляет регулировать величину давления на пакет.

В Институте импульсных процессов и технологий НАН Украины предложен новый одностадийный способ твердофазного синтеза МИЛ, основанный на пропускании тока через сжатый слоистый пакет объекта обработки [11–15]. Как известно, действие электрического тока на разные материалы проявляется не только в джоулевом нагреве, заметим, что не со стороны поверхности объекта обработки, как при термонагреве, а изнутри. Кроме того, электрический ток по своим функциональным возможностям является активным инструментом, интенсифицирующим прежде всего процессы переноса [16–18]. Но и при термонагреве, и при пропускании тока наличие давления сжатия объекта обработки является необходимым условием как для обеспечения

надежного контакта между слоями, участвующими в синтезе, так и для регулирования его процессов. Таким образом, принцип синтеза МИЛ при электротокном воздействии можно классифицировать как барроэлектрический синтез (БЭС). Ранее в работах [13–15] с помощью описанного в них оборудования и с использованием изложенных там методик были показаны функциональные возможности этого принципа. При этом было экспериментально определено, что единственным продуктом такой обработки является триалюминид титана  $Al_3Ti$ ; доказано, что БЭС является в несколько раз менее энергоемким, чем горячее изотермическое прессование, а время обработки уменьшается в 2–3 раза. Такой эффект можно объяснить только изменением базовых физических принципов синтеза, очевидно, за счет не только теплового действия тока. Представленные в [13–15] экспериментальные данные обладают первичной экспериментальной информацией, на основе которой можно сформулировать в формализованном виде некоторые закономерности процессов БЭС ламината  $Ti-Al_3Ti$  из пакета фольги  $Al-Ti$  и выявить механизмы, дополняющие эффекты твердотельной концентрационной диффузии, что в конечном итоге и приводит к сокращению времени обработки.

Цель работы – определить динамику преобразований структуры, электрические и термодинамические характеристики в многослойном пакете в процессе его барроэлектрической обработки для синтеза металл-интерметаллидных ламинатов  $Ti-Al_3Ti$ .

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим пакет послойной фольги  $Al$  и  $Ti$  с толщинами соответственно  $\delta_{Al}$  и  $\delta_{Ti}$ , с одинаковыми размерами длины  $l$  и ширины  $a$ , которые уложены так, что фольга  $Ti$  является первой и последней. Схема обработки пакета током показана на рис. 1.

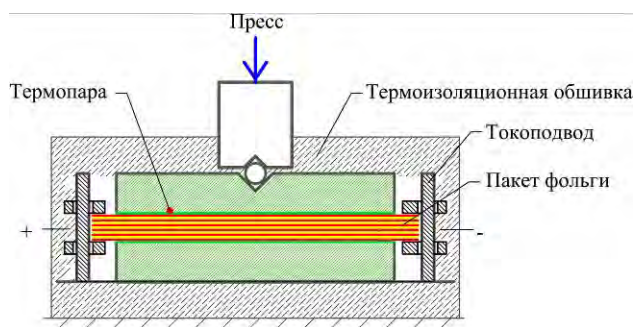


Рис. 1. Схема нагружения пакета фольги электрическим током.

Постоянный ток величиной  $I$  пропускается вдоль фольги, прессом создается постоянное сжимающее их усилие. Технологическая камера

теплоизолирована, при этом обеспечивается поддержание температуры в пакете величиной  $630^\circ C$ , то есть на  $30^\circ C$  меньше, чем температура плавления  $Al$  фольги ( $660^\circ C$ ).

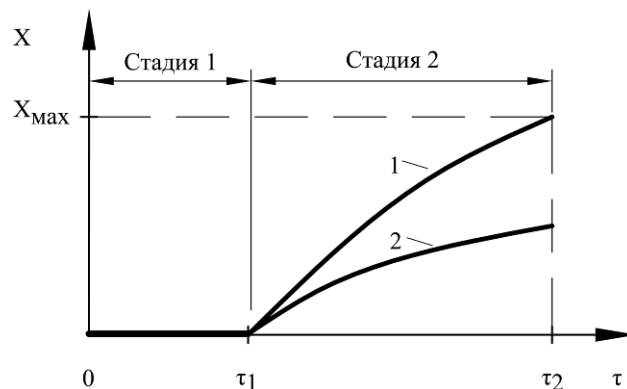


Рис. 2. Качественная зависимость роста интерметаллида в пакете фольги: 1 – при барроэлектрическом синтезе; 2 – при изотермическом прессовании;  $X$  – толщина слоя  $Al_3Ti$ ;  $\tau_1$  – время инкубационной стадии;  $(\tau_2 - \tau_1)$  – время стадии синтеза ламината.

Процесс синтеза претерпевает две последовательные стадии (рис. 2): формирование биметаллического соединения (стадия 1) и формирование системы  $Ti-Al_3Ti$  (стадия 2). Первая стадия соответствует инкубационному периоду формирования условий синтеза  $Al_3Ti$ . Длительность этой стадии можно оценить из известного соотношения для среднестатистического расстояния  $L$ , которое за время  $\tau$  преодолевают частицы диффундирующего вещества при условии, что коэффициент диффузии равен  $D$ :

$$\tau \approx L^2/D. \quad (1)$$

На основе ранее полученных результатов выполним тестовые расчеты процесса БЭС для следующих исходных данных, которые использованы в работах [13–15]:  $\delta_{Al} = \delta_{Ti} = 50$  мкм;  $l = 90$  мм;  $a = 10$  мм; количество фольги определяет величину толщины пакета  $\approx 1$  мм; усилие прессования обеспечивает величину давления 25 МПа; плотности  $\gamma$   $Al$ ,  $Ti$ ,  $Al_3Ti$  при  $630^\circ C$  – соответственно равны 2560, 4420 и 3300 кг/м<sup>3</sup> [19]; коэффициент диффузии  $Al$  в  $Ti$   $D \approx 0,6 \cdot 10^{-15}$  м<sup>2</sup>/с (без учета пропускания тока) при температуре  $600^\circ C$  [20]; коэффициент диффузии в слое  $Al_3Ti$  неизвестен; удельное электрическое сопротивление  $\rho$  слоев  $Al$ ,  $Ti$ ,  $Al_3Ti$  при  $630^\circ C$  – соответственно равно  $10,18 \cdot 10^{-8}$ ,  $143 \cdot 10^{-8}$ ,  $27 \cdot 10^{-8}$  Ом·м [19]; удельные теплоемкости  $c$   $Al$ ,  $Ti$ ,  $Al_3Ti$  при  $630^\circ C$  – соответственно равны 1228, 648, 1013 Дж/(кг·К). Значения теплоемкости  $Al$  и  $Ti$  взяты из [19], а значение  $c$  для  $Al_3Ti$  оценено с помощью правила Неймана-Коппа [21], в соответствии с которым теплоемкость соединения металлов в твердом состоянии определяется суммой удельных пар-

циальных теплоемкостей компонентов. Масса одной фольги  $M^1_{Al}$  и  $Ti$  – соответственно равна  $12,5 \cdot 10^{-5}$  и  $20,25 \cdot 10^{-5}$  кг; масса одного атома  $Al$  и  $Ti$  – соответственно равна  $44,79 \cdot 10^{-27}$  и  $79,48 \cdot 10^{-27}$  кг; количество атомов в одной фольге  $Al$  и  $Ti$  рассчитывается из отношения массы фольги к массе атома и составляет соответственно  $27 \cdot 10^{20}$  и  $25 \cdot 10^{20}$ ; масса одной молекулы  $Al_3Ti$  –  $213,85 \cdot 10^{-27}$  кг.

### Динамика формирования слоев ламината

Единственным механизмом, формирующим МИЛ, является твердофазный синтез, в основе которого лежат диффузионные процессы, протекающие по различным механизмам. Что касается пары  $Ti-Al$ , то из-за существенной разницы в температуре плавления этих металлов, разницы величин теплоты сублимации и массы атомов, а также из-за того, что при температуре порядка  $600^\circ C$  растворимость  $Al$  в  $Ti$  составит 11,7%, а  $Ti$  в  $Al$  – 0,12% [20, 22–24], можно принять за основу однонаправленный поток атомов  $Al$  в сторону  $Ti$ . Эти же рассуждения можно распространить и на диффузионный поток через слой  $Al_3Ti$ .

На основании экспериментальных данных [13–15] можно принять, что на стадии инкубационного периода биметаллическая прослойка, обеспечивающая надежное монолитное диффузионное соединение  $Al$  и  $Ti$  фольги, может быть принята толщиной  $\approx 2$  мкм. Тогда в соответствии с формулой (1) при  $D \approx 0,6 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2/\text{с}$  для изотермического прессования время инкубационного периода  $\tau_1 \approx 1,8$  часа. По данным эксперимента для этого способа обработки  $\tau_1$  лежит в пределах от 1,5 до 2 часов. В случае барроэлектрической обработки величина  $\tau_1$  сокращается до 1 часа, то есть электрический ток функционально увеличивает коэффициент диффузии на этой стадии от 1,5 до 2 раз.

Трансформацию слоев пакета фольги при синтезе ламината  $Ti-Al_3Ti$  на второй стадии принятого идеализированного процесса синтеза представим на рис. 3. Здесь исходное состояние определяется формированием биметаллического соединения за время  $\tau_1$ , а окончание процесса соответствует времени  $\tau_2$  (рис. 2). То есть время второй стадии определим как  $\tau_C = (\tau_2 - \tau_1)$ . Окончание процесса характеризуется 100% растворением фольги  $Al$  и образованием ламината  $Ti-Al_3Ti$ . В общем виде толщину слоев  $A$  и  $B$  (рис. 3в) определим из следующих соображений. Для формирования слоя  $A$  затрачивается вся масса фольги  $Al$ ,  $M_{Al} = 12,5 \cdot 10^{-5}$  кг, а учитывая то, что для соединения  $Al_3Ti$  необходимо 3 атома  $Al$  и 1 атом  $Ti$  ( $3 \cdot M_{Al}^1, M_{Ti}^1$ ), после простых преобразований получим следующую формулу:

$$\frac{\rho_{Al} \cdot M_{Ti}^1}{3 \cdot \rho_{Ti} \cdot M_{Al}^1} = \frac{\delta_{Ti}}{\delta_{Al}} - \frac{B}{\delta_{Al}}, \quad (2)$$

левая часть которой равна 0,343.

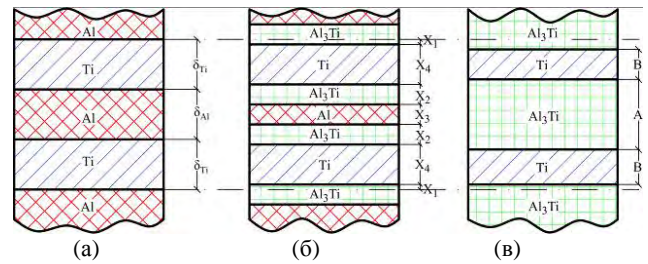


Рис. 3. Схема трансформации слоев пакета фольги  $Al-Ti$ : (а) – исходное состояние; (б) – промежуточное состояние; (в) – окончание процесса.

Тогда в общем виде в конечном результате синтеза толщины слоев ламината определим следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} B &= \delta_{Ti} - 0,343 \cdot \delta_{Al}; \\ A &= 1,343 \cdot \delta_{Al}. \end{aligned} \quad (3)$$

Следуя той же процедуре расчета, учитывающей постоянный поатомный диффузионный переход алюминия через образующийся слой  $Al_3Ti$ , получим временные зависимости толщины слоев  $X_{2;3;4}$  в промежуточном состоянии (рис. 3б) с течением времени  $\tau_C$ . При этом учтем, что в связи с соотношением (1):

$$X_2 \approx \sqrt{D \cdot \tau}, \quad (4)$$

тогда после не сложных преобразований получим:

$$\begin{aligned} X_3 &= \delta_{Al} - 1,43 \cdot \sqrt{D \cdot \tau}; \\ X_4 &= \delta_{Ti} - 0,56 \cdot \sqrt{D \cdot \tau}, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $\tau$  – текущее время.

В предельном случае ( $\tau = \tau_C$ ):

$$X_2 = A/2; X_3 \approx 0; X_4 = B, \quad (6)$$

с учетом (4)

$$\sqrt{D \cdot \tau_C} = A/2; B \approx \delta_{Ti} - 0,56 \sqrt{D \cdot \tau_C}. \quad (7)$$

Таким образом, по формулам (3), если  $\delta_{Al} = \delta_{Ti} = 50$  мкм, то  $A \approx 67$  мкм;  $B \approx 33$  мкм. Данные эксперимента [13–15] как при БЭС, так и при изотермическом прессовании показали, что после 100% преобразования алюминиевой фольги  $A \approx 70$  мкм;  $B \approx 30$  мкм, что косвенно свидетельствует о правильном выборе методики расчета.

Проанализируем возможности прогнозирования результатов обработки пакета с помощью полученных формул. Прежде всего заметим, что они позволяют определять конечные толщины слоев ламината в зависимости от материала выбранной фольги и ее толщины независимо от

физического принципа обработки, но при условии реализации твердофазного синтеза. Как ранее отмечалось, функциональное назначение синтезированного ламината определяется соотношением  $B/A$ , которым можно управлять подбором толщины фольги с помощью формул (3). В то же время сокращение длительности обработки позволяет функциональными возможностями метода обработки увеличивать интегральное значение коэффициента диффузии как на стадии инкубационного цикла, так и цикла синтеза.

Полученные соотношения (7) позволяют оценить некое интегральное значение коэффициента диффузии  $D$  без привязки его к конкретным механизмам диффузионного переноса. То есть, получив в эксперименте за время  $\tau_c$  ламинат, по данным металлографии [13] измерим среднестатистические величины толщин слоев интерметаллида  $A$  и оставшегося титана  $B$ , затем с помощью формул (7) определим величину  $D$ . Так, при времени синтеза 4 часа толщина слоя  $Al_3Ti \approx 70$  мкм, тогда величину  $D$  отметим значением  $0,8 \cdot 10^{-13} \text{ м}^2/\text{с}$ .

Далее проанализируем возможные условия сокращения времени обработки при БЭС по сравнению с изотермическим прессованием.

Для фольги с толщиной пакета 50 мкм эксперимент показал, что полное время обработки  $\tau_2$  при изотермическом прессовании пакета толщиной  $\approx 1$  мм составляет величину от 7 до 8 часов. В случае же БЭС оно может быть сокращено на величину от 3 до 4 часов [13–15].

Такой результат можно получить только в случае активизации процессов диффузионного переноса за счет многофункционального действия электрического тока, если пренебрегать его влиянием на ускорение химической реакции образования соединения  $Al_3Ti$ .

Как известно, полный закон Фика определяет поток частиц при диффузионном переносе как сумму потоков, возникающих при наличии градиентов концентраций, температуры, давления и разности потенциалов. Экспериментально доказано, что здесь преобладают потоки, обусловленные градиентом концентрации; вклад электронного ветра, возникающего при прохождении тока, весьма мал; градиенты давления в рассматриваемом случае синтеза отсутствуют. Но в твердом поликристаллическом металлическом материале этот поток значительно усиливается механизмами межзеренной диффузии [23, 24], а тем более при наличии электропластического эффекта [25, 26], при котором электромагнитное поле может существенно увеличивать скорость ползучести, активируя в свою очередь процессы межзеренной диффузии как в слое триалюмини-

да титана, так и при формировании биметалла на стадии инкубационного цикла.

#### *Электрические и термодинамические характеристики слоев ламината*

При БЭС в структурной системе  $Ti-Al_3Ti-Al$  имеем вариант параллельного соединения проводников, сопротивления которых  $R_i$  за счет изменения толщин  $X_i$  во времени изменяются в соответствии с формулами (4) и (5):

$$R_i = \rho_i \frac{l}{a \cdot X_i}, \quad (8)$$

где индекс  $i = 2$  соответствует слою из  $Al_3Ti$ ;  $i = 3$  – из  $Al$ ;  $i = 4$  – из  $Ti$  (рис. 3б).

Полный ток в цепи величиной  $I$  в пакете распределяется по его слоям в соответствии с параллельным соединением проводников, общее количество слоев  $k_\Sigma = 4k+1$ , где  $k$  – количество слоев  $Al$ ;  $(k+1)$  – количество слоев  $Ti$ ;  $2k$  – количество слоев  $Al_3Ti$ .

Количество тепла, получаемого каждым слоем за 1 сек,

$$Q_i = I_i^2 \cdot R_i, \quad (9)$$

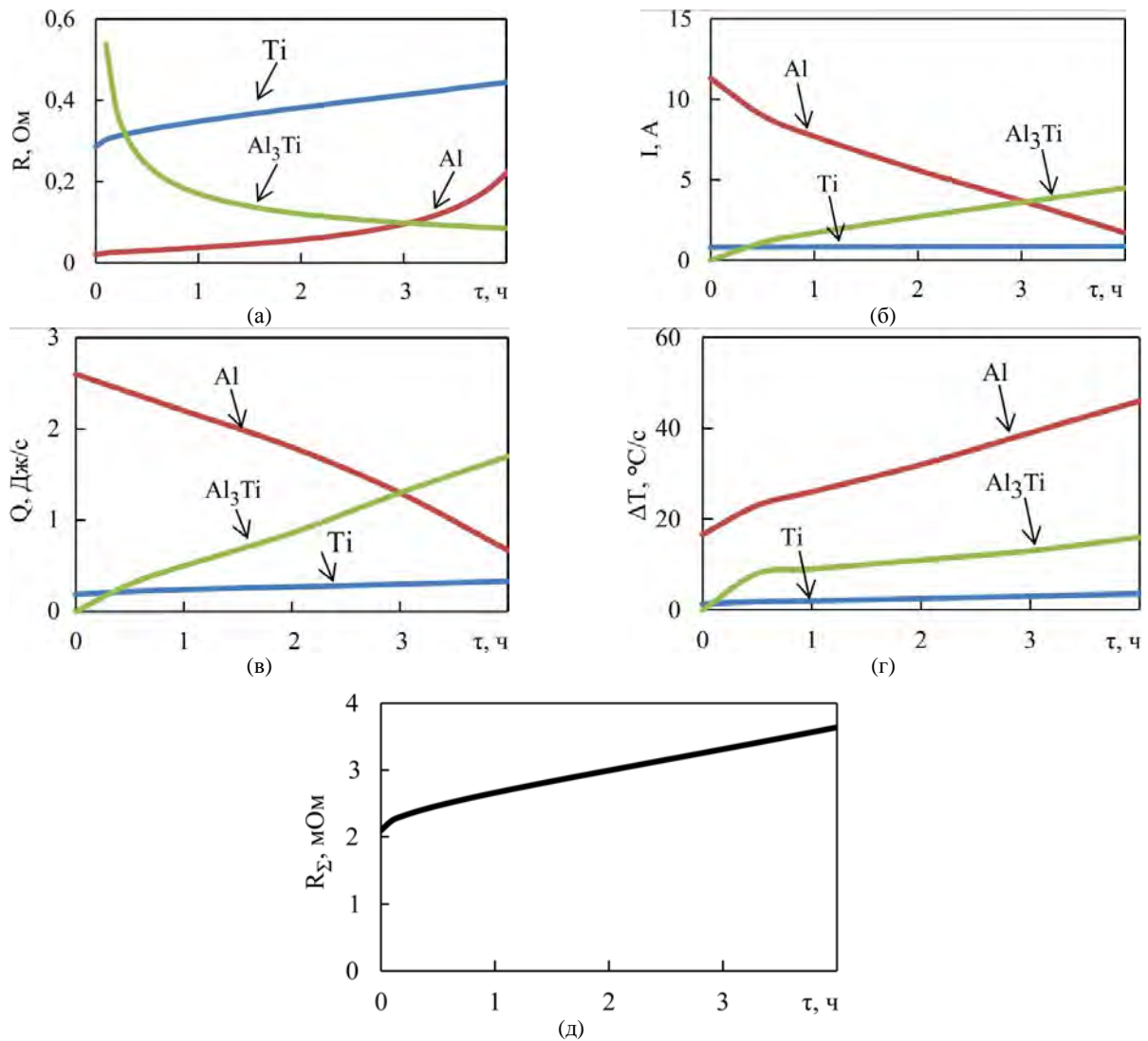
а скорость нагревания слоя без учета теплоотдачи (что вполне допустимо в условиях термостатированного технологического реактора) определим следующей зависимостью:

$$\Delta T_i = \frac{Q_i}{m_i \cdot c_i} = \frac{I_i^2 \cdot \rho_i \cdot l}{m_i \cdot c_i \cdot a \cdot X_i} = \frac{I_i^2 \cdot \rho_i}{\gamma_i \cdot c_i \cdot a^2 \cdot X_i^2}, \quad (10)$$

где  $m_i$  – масса  $i$ -го слоя.

На рис. 4 представлены соответствующие временные зависимости электрических и термодинамических характеристик в интервале времени  $\tau_c$  длительностью 4 часа при величине тока в цепи 110 А и при толщинах слоев  $X_i$ , которые определялись по формулам (4), (5). При этом значения  $\delta_{Al}$  и  $\delta_{Ti}$  равны по 50 мкм, значение коэффициента диффузии соответственно определено как  $A^2/4\tau_c \approx 0,8 \cdot 10^{-13} \text{ м}^2/\text{с}$ .

Здесь самым показательным является рис. 4г. Как видим, между слоями возникает разность температур так, что образуется на протяжении всего времени синтеза ее градиент, совпадающий с концентрационным, что должно определенным образом ускорять диффузионный поток в направлении от  $Al$  к  $Ti$ . При этом отметим, что уже по истечении двух часов ежесекундный прогрев слоя  $Al$  на критическую величину  $30^\circ\text{C}$  может приводить к подплавлению слоя  $Al$ . Это выдвигает определенные требования к системе отключения электрической цепи, для которой нужно устанавливать на терморегуляторе, предназначенном для поддержания заданной темпе-



**Рис. 4.** Временные зависимости электрических и термодинамических параметров элементов пакета при барроэлектрическом синтезе ламината: (а) – изменение сопротивлений слоев; (б) – изменение амплитуды тока в слоях; (в) – изменение скорости ввода тепла в слои; (г) – изменение скорости нагрева слоев; (д) – изменение сопротивления пакета.

ратуры обработки, диапазон регулирования не более  $1^\circ\text{C}$  (то есть  $630 \pm 1^\circ\text{C}$ ), так как и система отключения, и процессы нагрева (отвод тепла) инерционны.

Оценить величину предельного тока  $I_{\text{пр}}$  в фольге Al можно из соотношения (11), при выполнении которого может наступить нарушение электрической проводимости слоя Al за счет его оплавления:

$$\frac{\Delta T}{t} = \frac{I_{\text{пр}}^2 \cdot R_{\text{Al}}^1}{c_{\text{Al}} \cdot M_{\text{Al}}^1}, \quad (11)$$

где  $R_{\text{Al}}^1$  – сопротивление одной алюминиевой фольги;  $M_{\text{Al}}^1$  – масса одной алюминиевой фольги.

Для пакета толщиной 1 мм, обрабатываемого при температуре  $630^\circ\text{C}$ , толщинах Al и Ti по 50 мкм  $I_{\text{пр}} = 15 \text{ А}$ . Это соответствует величине предельного тока в цепи 150 А. Эксперимент показал значение 160 А. Естественно, для другой геометрии слоев это значение будет иным. После

определенного времени обработки (в рассмотренном случае это 2 часа) можно рекомендовать применять соответствующие процедуры, постепенно понижающие температуру нагрева во избежание неконтролируемых ситуаций. Этой процедурой может быть уменьшение тока в цепи, коррелирующее с зависимостью  $R_\Sigma(\tau)$  (рис. 4д).

Проанализируем влияние отношения  $a/l$ , а также  $\delta_{\text{Al}}/\delta_{\text{Ti}}$  и общей толщины пакета на термодинамические процессы в нем, основываясь на зависимостях (4), (5), (8)–(10).

Для разных соотношений  $a/l$  скорости ввода энергии для каждого из слоев  $dQ_i/dt \sim a^{-1}$ , а  $\Delta T_i \sim a^{-2}$ . Так как  $\Delta T_i \sim (I/a)^2$ , то поддержание постоянной скорости подогрева при увеличении  $a/l$  при  $l = \text{const}$  может обеспечиваться адекватным увеличением величины тока.

Если количество тепла, необходимое для нагревания однородного тела на величину  $\Delta T$ ,

$$Q_{\Sigma} = c \cdot m \cdot \Delta T = I^2 \cdot R_{\Sigma} \cdot t, \quad (12)$$

то, конечно же, увеличение толщины тела  $\delta$  увеличивает его массу на величину приращения толщины. Но при этом уменьшается сопротивление как  $R_{\Sigma} = f(\delta^{-1})$ , таким образом  $\Delta T \approx f(\delta^{-2})$ . Эксперименты [13–15] показали, что при увеличении толщины пакета в 3 раза за счет увеличения количества фольги для 100% синтеза интерметаллида необходимо было увеличить ток в 1,5 раза. Этот результат объясняется тем, что барро-электрический синтез обеспечивается не только общим количеством подводимого тепла  $Q_{\Sigma}$ , но и значениями тока в каждом слое пакета и их сопротивлениями, как было показано выше. При этом качественный характер кривых, представленных на рис. 4, сохраняется.

Если, например, для постоянной толщины пакета толщину фольги Al уменьшить в  $n$  раз, то есть  $\delta_1/\delta_2 = n$ , то  $(R_{Al})_2/(R_{Al})_1 = n$ , то есть при одинаковых значениях тока в цепи изменится распределение этого тока в слоях так, что  $(I_2/I_1)_{Ti} = (I_1/I_2)_{Al} = \sqrt{n}$ ; в свою очередь  $(R_{Ti}/R_{Al})_1 = (R_{Ti}/R_{Al})_2 = n$ . И, наконец,  $(Q_2/Q_1)_{Ti} = n$ ;  $(Q_{Al}/Q_{Ti})_1/(Q_{Al}/Q_{Ti})_2 = n$ ;  $(\Delta T_2/\Delta T_1)_{Ti} = (\Delta T_2/\Delta T_1)_{Al} = n$ ;  $\Delta T_{Ti}/\Delta T_{Al} = \text{const}$ . То есть градиенты температур за счет перераспределения токов не изменяются. Но здесь нужно заметить, что при уменьшении величины  $\delta_{Al}$  скорость нагрева фольги увеличится. Это влечет за собой соответствующее уменьшение интервала времени подогрева, а значит, и адекватное уменьшение величины тока в цепи.

## ВЫВОДЫ

1. В работе предложена процедура расчета базовых параметров электротокковой обработки многослойного пакета Al-Al<sub>3</sub>Ti-Ti для получения монолитного металл-интерметаллидного ламината Ti-Al<sub>3</sub>Ti из набора фольги Al-Ti.

2. Определено наличие градиента температур между слоями пакета за счет их Джоулева нагрева, ориентирующих дополнительный диффузионный перенос атомов в направлении концентрационного, который, в свою очередь, ускоряется эффектами электроползучести.

3. Показаны условия нагружения с учетом их предельно допустимых параметров, обеспечивающих существенное снижение времени обработки по сравнению с горячим изостатическим прессованием.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Narach D.J., Vecchio K.S. *Metall Mater Trans A*. 2001, **32**, 1493–1504.
2. Lazurenko D.V., Mali V.I., Shevtsova K.E. *Appl Mech Mater*. 2014, **682**, 132–137.

3. Lazurenko D.V., Mali V.I., Thoemmes A. *Appl Mech Mater*. 2014, **698**, 277.
4. Шморгун В.Г., Трыков Ю.П., Слаутин О.В. *Конструкции из композиционных материалов*. 2005, (3), 3–9.
5. Коржов В.П., Карпов М.И. *Физика и техника высоких давлений*. 2011, **21**(2), 92–102.
6. Лазуренко Д.В., Матц О.Э., Кузьмин К.А. *Материалы I международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы в машиностроении»*. 26 марта, 2014, г. Новосибирск, Россия. С. 514–520.
7. Vecchio K., La Jolla Ca. *Fabrication of Interleaved Metallic and Intermetallic Composite Laminate Materials*. U. S. Patent 7, 188, 559, issued March 13, 2007.
8. Xu L., Gui Y.Y., Hao Y.L., Yang R. *Mater Sci Eng A*. 2006, **435**, 638–647.
9. Peng L.M., Li H., Wang J.H. *Mater Sci Eng A*. 2005, **406**, 309–318.
10. Kiyoshi Mizuuchi, Kanryu Inoue, Masami Sugioka, Masao Itami, Masakazu Kawahara. *Scripta Mater*. 2004, **45**(2), 249–256.
11. UA пат. 104683, 2013. *Способ одержання шаруватого метал-інтерметалідного композиційного матеріалу*. Бюл. № 15. 4 с.
12. UA пат. 90274, *Способ одержання шаруватого метал-інтерметалідного композиційного матеріалу*. 2013. Бюл. № 10. 5 с.
13. Синчук А.В., Цуркин В.Н., Иванов А.В., Дмитришина Я.Ю., и др. *Конструкции из композиционных материалов*. 2014, (1), 24–32.
14. Синчук А.В., Васянович Н.А. *Сборник тезисов докладов 8-й Международной конференции МЕЕ*. 2014, 22–26 сентября, г. Киев. С. 56.
15. Синчук А.В., Цуркин В.Н., Дмитришина Я.Ю. *Сборник тезисов докладов 4-й Международной конференции High Mat Tech*. 2013, 07–11 октября, г. Киев. С. 293.
16. Бедюх А.Р. *ФТТ*. **31**(3), 313–315.
17. Кучук-Яценко С.И., Харченко Г.К., Миронов В.И., Миронов Д.В., и др. *Металлофизика и новейшие технологии*. 2014, **36**(9), 1171–1187.
18. Лозовой В.И. *Металлофизика и новейшие технологии*. 1998, **20**(7), 55–63.
19. Зиновьев В.Е. *Теплофизические свойства металлов при высоких температурах*. М.: Металлургия, 1989. 318 с.
20. Смитлз К.Дж. *Металлы*. Справочное издание. Пер. с англ. М.: Металлургия, 1980. 447 с.
21. Лившиц Б.Г., Крапошин В.С., Линицкий Я.Л. *Физические свойства металлов и сплавов*. М.: Металлургия, 1980. 320 с.
22. Мондольфо Л.Ф. *Структура и свойства алюминиевых сплавов*. М.: Металлургия, 1979. 640 с.
23. Бокштейн Б.С., Ярославцев А.Б. *Диффузия атомов и ионов в твердых телах*. М.: МИСИС, 2005. 362 с.

24. Neumann C., Tuijnc C. *Self-Diffusion and Impurity in Pure Metals: Handbook of Experimental Data*. Amsterdam: Elsevier, 2009. 349 p.
25. Троицкий О.А., Спицын В.И. *ДАН СССР*. 1974. **216**(6), 1266–1269.
26. Sprecher A., Mannan S., Conrad H. *Acta Metallurgica*. 1986, **34**(7), 1145–1162.

*Поступила 17.12.14*

*После доработки 12.02.15*

### Summary

A procedure of the calculation of basic parameters of the baroelectric treatment of a multi-layered package of Al-Al<sub>3</sub>Ti-Ti at the synthesis of monolithic metal-intermetallic laminate of Ti-Al<sub>3</sub>Ti from a set of Al-Ti foils is offered. The terms of loading are presented, at which there is a substantial decline of the treatment time as compared to that under a hot isostatic pressing.

*Keywords: multi-layered foil system, metal-intermetallic laminate, electric current, diffusion, solid phase synthesis.*