

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*

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 δ_{Al} и δ_{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.

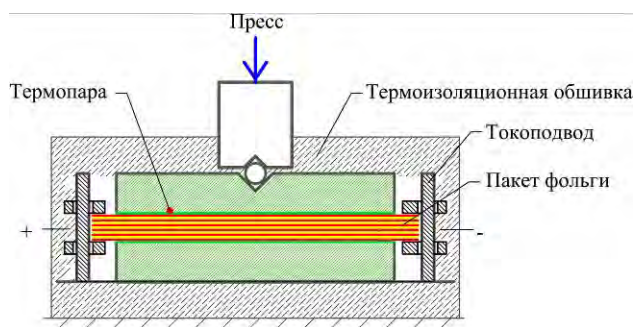


Рис. 1. Схема нагружения пакета фольги электрическим током.

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 ($660^\circ C$).

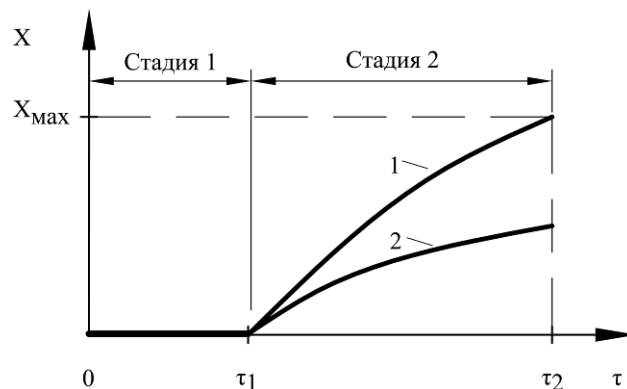


Рис. 2. Качественная зависимость роста интерметаллида в пакете фольги: 1 – при барроэлектрическом синтезе; 2 – при изотермическом прессовании; X – толщина слоя Al_3Ti ; τ_1 – время инкубационной стадии; $(\tau_2 - \tau_1)$ – время стадии синтеза ламината.

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 τ 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 ≈ 1 мм; усилие прессования обеспечивает величину давления 25 МПа; плотности γ Al , Ti , Al_3Ti при $630^\circ C$ – соответственно равны 2560 , 4420 и 3300 кг/м³ [19]; коэффициент диффузии Al в Ti $D \approx 0,6 \cdot 10^{-15}$ м²/с (без учета пропуска тока) при температуре $600^\circ C$ [20]; коэффициент диффузии в слое Al_3Ti неизвестен; удельное электрическое сопротивление ρ 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 ≈ 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 τ_1 лежит в пределах от 1,5 до 2 часов. В случае барроэлектрической обработки величина τ_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 τ_1 , а окончание процесса соответствует времени τ_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.

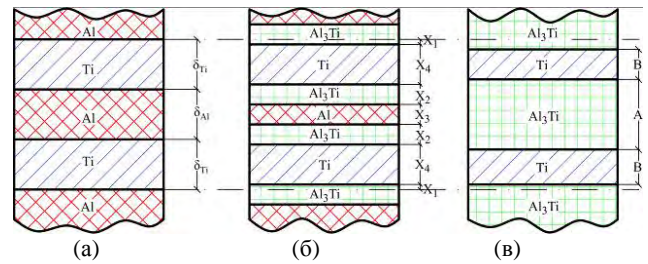


Рис. 3. Схема трансформации слоев пакета фольги $Al-Ti$: (а) – исходное состояние; (б) – промежуточное состояние; (в) – окончание процесса.

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 τ_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 τ – 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 τ_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 τ_2 при изотермическом прессовании пакета толщиной ≈ 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 τ_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 δ_{Al} и δ_{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°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-

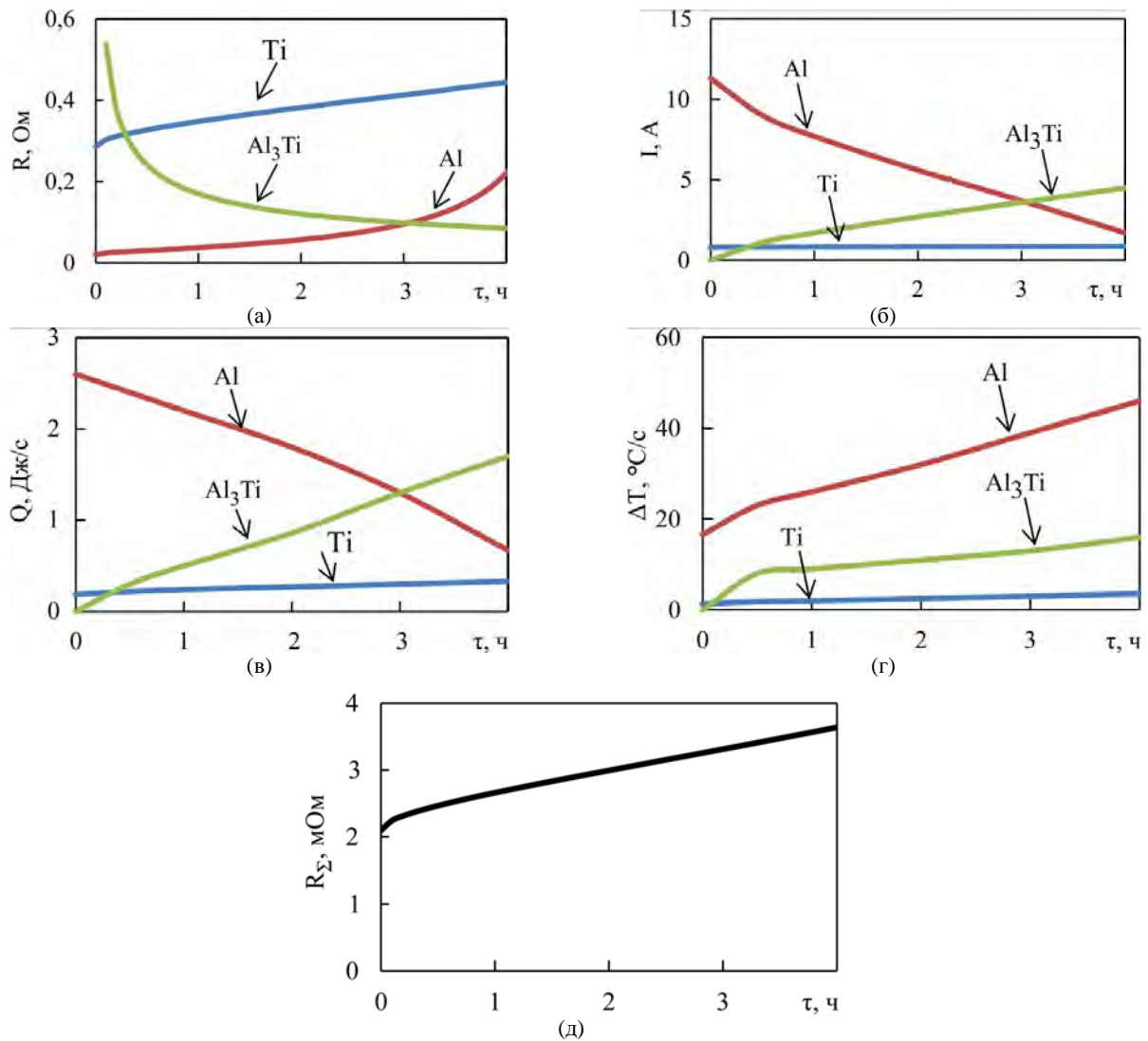


Рис. 4. Временные зависимости электрических и термодинамических параметров элементов пакета при барроэлектрическом синтезе ламината: (а) – изменение сопротивлений слоев; (б) – изменение амплитуды тока в слоях; (в) – изменение скорости ввода тепла в слои; (г) – изменение скорости нагрева слоев; (д) –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

ратуры обработки, диапазон регулирования не более 1°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_{Al}^1 – сопротивление одной алюминиевой фольги; M_{Al}^1 – масса одной алюминиевой фольги.

Для пакета толщиной 1 мм, обрабатываемого при температуре 630°C , толщинах Al и Ti по 50 мкм $I_{\text{пр}} = 15$ 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 ΔT ,

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

то, конечно же, увеличение толщины тела δ 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_{Σ} , 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 δ_{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-Al₃Ti-Ti для получения монолитного металл-интерметаллидного ламината Ti-Al₃Ti 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-Al₃Ti-Ti at the synthesis of monolithic metal-intermetallic laminate of Ti-Al₃Ti 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.