

В. Г. Шморгун¹, О. В. Слаутин¹, М. В. Крохалев¹, Д. А. Евстропов², С. А. Кузнецов¹

**ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЗАТРАТ ПРИ ДИФфуЗИОННОМ ОТЖИГЕ
СВАРЕННОГО ВЗРЫВОМ БИМЕТАЛЛА VT1-0 + M1***

¹Волгоградский государственный технический университет

²Волгоградская академия МВД РФ

e-mail: mv@vstu.ru¹

Приведена методика, позволяющая оптимизировать процесс диффузионного отжига сваренного взрывом биметалла титан-медь с учетом тепловых затрат на формирование покрытий на основе купридов титана и потерь на нагрев печи, выдержку при заданной температуре, загрузку и выгрузку заготовок.

Ключевые слова: сварка взрывом, биметалл, диффузионный отжиг, куприды титана, тепловые затраты.

V. G. Shmorgun¹, O. V. Slautin¹, M. V. Krokhalev¹, D. A. Evstropov², S. A. Kuznetsov¹

**ESTIMATION OF ENERGY CONSUMPTION DURING DIFFUSION ANNEALING
OF EXPLOSION WELDED BIMETAL VT1-0 + M1**

¹Volgograd State Technical University

²Volgograd Academy of the Ministry of Internal Affairs of the Russian Federation

A technique is presented that makes it possible to optimize the process of diffusion annealing of an explosion-welded titanium-copper bimetal, taking into account the heat costs for the formation of coatings based on titanium cuprides and losses for heating the furnace, holding at a given temperature, loading and unloading workpieces.

Keywords: explosion welding, bimetal, diffusion annealing, titanium cuprides, heat costs.

Технология получения на титановых подложках покрытий на основе купридов титана предусматривает сварку взрывом биметаллических заготовок медь-титан, их последующую прокатку (при необходимости) и термообработку (ТО) для формирования на межслойной границе диффузионной зоны (ДЗ) с требуемым химическим и фазовым составом [1–6].

Поскольку требуемые толщины и химический состав ДЗ могут быть получены в широком температурно-временном диапазоне ТО предварительно полученного биметалла, то при назначении режимов ТО необходимо учитывать затраты энергоресурсов при эксплуатации печного оборудования.

Для расчета энергозатрат на ТО биметалла титан-медь рассмотрим цикл, включающий нагрев печи, диффузионный отжиг поштучно N заготовок, отключение печи.

Затраты энергии на цикл составляют [7]:

$$Q = Q_{\text{пол}} + \sum Q_{\text{пот}}, \quad (1)$$

где $Q_{\text{пол}}$ – количество теплоты, потребное для нагрева заготовок до заданной температуры, Дж; $Q_{\text{всп}}$ – количество теплоты, потребное для нагрева вспомогательных устройств, вводимых в печь вместе с заготовкой (поддоны, крючья), Дж; $\sum Q_{\text{пот}}$ – суммарные тепловые потери за цикл.

Количество теплоты, затрачиваемое на нагрев изделий (полезная теплота) определяется по формуле:

$$Q_{\text{пол}} = N \cdot \sum_{i=1}^n C_{\text{изд}(i)} \cdot m_{\text{изд}(i)} (t_{\text{изд}}^{\text{кон}} - t_{\text{изд}}^{\text{нач}}), \quad (2)$$

где N – количество изделий, шт; $C_{\text{изд}(i)}$ – удельная теплоемкость однородной части изделия, Дж/(кг·°C); $m_{\text{изд}(i)}$ – масса однородной части изделия, кг; $t_{\text{изд}}^{\text{кон}}$ и $t_{\text{изд}}^{\text{нач}}$ – конечная и начальная температуры заготовки, °C.

Для равномерного прогрева заготовок проводить их ТО необходимо поштучно. Вследствие этого, вспомогательные устройства не используются, и расчет потерь энергии на их нагрев не ведется.

Общие потери энергии при термообработке биметаллических заготовок определяются по формуле:

$$\sum Q_{\text{пот}} = k_n (Q_{\text{пот}(н)} + Q_{\text{пот}(с)} + Q_{\text{пот}(зв)}), \quad (3)$$

где k_n – коэффициент неучтенных потерь ($k_n = 1,15 - 1,3$); $Q_{\text{пот}(н)}$, $Q_{\text{пот}(с)}$, $Q_{\text{пот}(зв)}$ – тепловые потери соответственно при нагреве печи, выдержке при заданной температуре, загрузке и выгрузке заготовок, Дж.

Тепловые потери при нагреве печи складываются из затрат на нагрев печи и тепловых потерь через стенки печи:

$$Q_{\text{пот}(н-кл)} = C_{\text{кл}}^{\text{ср}} \cdot m_{\text{кл}} (t_{\text{кл}}^{\text{кон}} - t_{\text{кл}}^{\text{нач}}), \quad (4)$$

где $C_{\text{кл}}^{\text{ср}}$ – средняя удельная теплоемкость кладки печи, Дж/(кг·°C); $m_{\text{кл}}$ – масса кладки печи, кг; $t_{\text{кл}}^{\text{кон}}$ и $t_{\text{кл}}^{\text{нач}}$ – конечная и начальная температуры кладки печи, °C.

Расчет затрудняется сложным распределением температуры по толщине кладки и использованием огнеупоров по объему кладки. Принимаем допущение, что $t_{\text{кл}}^{\text{кон}} = 0,5 \cdot t_{\text{печ}}^{\text{кон}}$.

Затраты на тепловые потери через стенки:

$$Q_{\text{пот}(н-ст)} = \alpha \cdot F_{\text{нов}} \tau_n (t_{\text{ст}}^{\text{нар}} - t_o), \quad (5)$$

где α – коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности печи, Дж/(м²·с·град), в соответствии с рекомендациями [8] принимаем $\alpha = 18$ Дж/(м²·с·град); $F_{\text{нов}}$ – суммарная наружная поверхность стенок, м²; τ_n – время нагрева печи до заданной температуры, с; $t_{\text{ст}}^{\text{нар}}$ – средняя температура наружной стенки, °C; t_o – температура окружающей среды, °C.

В связи с тем, что температура наружной стенки изменяется по сложному закону можно принять, что $t_{\text{ст}}^{\text{нар}} = 0,5 (t_{\text{ст-макс}}^{\text{нар}} + t_o)$, где $t_{\text{ст-макс}}^{\text{нар}}$ – максимальная температура стенки при выходе на режим. При расчете теплоизоляции печей не допускается $t_{\text{ст}}^{\text{нар}}$ свыше 70 °C при выходе на максимальную температуру печи. Условно принимаем: $t_{\text{ст}}^{\text{нар}} = (70 - t_o) t_{\text{печ}}^{\text{кон}} / t_{\text{печ}}^{\text{макс}} + t_o$, где $t_{\text{печ}}^{\text{макс}}$ – максимальная температура разогрева печи (по паспорту), °C.

Расчеты затрат на нагрев печи могут быть обеспечены, если в паспорте печи указано время на разогрев печи до максимальной температуры.

Приближенно время нагрева печи определяется:

$$\tau_n = \frac{C_{\text{кл}}^{\text{ср}} \cdot m_{\text{кл}} (t_{\text{кл}}^{\text{кон}} - t_{\text{кл}}^{\text{нач}})}{0,7P - \frac{1,5\alpha F_{\text{нов}}}{2} (t_{\text{ст}}^{\text{нар}} - t_o)}. \quad (6)$$

Отсюда (при $\tau_n = \tau_n^{\text{макс}}$) можно определить произведение $C_{\text{кл}}^{\text{ср}} \cdot m_{\text{кл}}$ для подстановки в формулу 4:

$$C_{\text{кл}}^{\text{ср}} \cdot m_{\text{кл}} = \frac{\tau_n^{\text{макс}} [0,7P - 0,75\alpha F_{\text{нов}} (70 - t_o)]}{0,5t_{\text{печ}}^{\text{макс}} - t_o}, \quad (7)$$

где P – потребляемая мощность печи, Вт; $\tau_n^{\text{макс}}$ – время разогрева холодной печи до максимальной температуры (по паспорту), °C.

Потери тепла при выдержке заготовок при заданной температуре определяются выражением:

$$Q_{пот(с)} = \alpha \cdot F_{нов} \tau_s (t_{ст}^{нар} - t_o), \quad (8)$$

Время выдержки деталей определяется временем нагрева до заданной температуры $\tau_{вн}$ и временем выдержки при заданной температуре $\tau_{вс}$

$$\tau_s = \tau_{вс} + \tau_{вн}.$$

Для тонких изделий

$$\tau_{вн} = \frac{m_{изд} C_{изд} (t_{изд}^{кон} - t_{изд}^{нач})}{C_{пр} \left[\left(\frac{T_{печи}^{кон}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{изд}^{нач}}{100} \right)^4 \right] F_{зо} + \alpha_{кон} (t_{изд}^{кон} - t_{изд}^{нач}) F_{зк}}, \quad (9)$$

где $C_{пр} = \frac{5,7}{\frac{1}{\epsilon_{нагр}} + \frac{1}{\epsilon_{изд}} - 1}$ – приведенная излучательная

способность; $\epsilon_{нагр}$ и $\epsilon_{изд}$ – коэффициент черноты материалов нагревателя и изделия (принимается равным 0,8); $F_{зо}$ – облучаемая поверхность заготовки (в условиях данного расчета нагревом за счет облучения можно пренебречь); $F_{зк}$ – поверхность заготовки, омываемая конвекцией; $\alpha_{кон}$ – коэффициент теплоотдачи естественной конвекцией, $\alpha_{кон} = 11,6 - 17,4$ Вт/(м²·град); $T_{печи}^{кон}$ и $T_{изд}^{нач}$ – соответственно абсолютная температура излучателей или разогретой кладки и исходная температура изделия, К.

Тепловые потери при загрузке-выгрузке

$$Q_{пот(зв)} = 5,7 \psi \left[\left(\frac{T_{печи}^{кон}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{изд}^{нач}}{100} \right)^4 \right] F_{пр} \tau_{зв} N, \quad (10)$$

где ψ – коэффициент диафрагмирования выходного отверстия (обычно 0,75–0,8); $F_{пр}$ – площадь выходного отверстия.

Входными данными для расчета тепловых затрат на формирование в биметалле диффузионной зоны заданной толщины являются требуемая ее толщина, температура и продолжительность ТО.

В качестве примера рассмотрим расчет энергозатрат на ТО для заготовки из биметалла титан ВТ1-0 + медь М1, размерами 200x150x7 мм при объемах партий изделий 100 штук. Исходя из размеров заготовок, была выбрана печь LF-7/13-G1. Ее технические характеристики представлены в табл. 1.

В качестве заданной толщины ДЗ выбраны следующие значения: 20, 100, 200, 500, 1000 и 2000 мкм.

Таблица 1

Технические характеристики электронагревательной печи марки LF-7/13-G1

Максимальная температура разогрева печи $t_{печ}^{max}$, °С	Время разогрева печи до максимальной температуры τ_n^{max} , ч	Потребляемая мощность Р, кВт	Размеры рабочего пространства печи, мм			Габаритные размеры печи, мм			Масса, кг
			а _{вн}	б _{вн}	с _{вн}	а _{нар}	б _{нар}	с _{нар}	
1300	2	3,3	285	200	110	510	555	595	40

Необходимое время выдержки при формировании ДЗ выбирали исходя из данных, полученных в работах [2–6].

Выходными данными расчета является дискретный ряд значений суммарных тепловых затрат, понесенных при формировании ДЗ заданной толщины в условиях различных температурных режимов. При наличии

равной предпочтительности температурно-временных условий ТО, из полученного ряда выбирают параметры наименее энергоемкого режима.

Результаты расчета каждого типа тепловых затрат для каждой из рассматриваемых партий, а также суммарных затрат приведены в табл. 2 и 3.

Таблица 2

Тепловые потери при нагреве печи, выдержке при заданной температуре, загрузке и выгрузке заготовки

Температура, °С	Тепловые потери, Дж							
	При нагреве печи	При загрузке-выгрузке одной детали	При формировании ДЗ толщиной, мкм					
			20	100	200	500	1000	2000
800	80152	72	6882	68820	206460	463578	–	–
850	85495	86	9422	94218	282653	659523	–	–
900	90839	103	29	73	1311	4326	6554	13109
950	96182	122	28	56	168	1344	2183	3359
1000	101526	143	28	52	143	819	1639	2867

Таблица 3

Общие потери энергии при ТО партии заготовок, кДж

Температура, °С	Толщина ДЗ, мкм					
	20	100	200	500	1000	2000
800	103	174	332	628	–	–
850	112	210	426	860	–	–
900	108	108	109	112	115	123
950	114	114	114	115	116	118
1000	120	120	120	121	122	123

Выводы

1. Расчеты показали, что суммарные энергозатраты при термообработке партии заготовок биметалла титан ВТ1-0 + медь М1 по режиму твердофазного взаимодействия увеличиваются с ростом толщины диффузионной зоны. При прочих равных условиях они минимальны при температуре термообработки 800 °С.

2. При формировании диффузионной зоны в результате термообработки по режиму контактного плавления (выше 900 °С) общие потери энергии практически не зависят от ее толщины.

3. Относительные затраты энергии на получение одной заготовки всегда снижаются с увеличением их количества за счет уменьшения тепловых потерь на нагрев печи, приходящихся на единицу изделия.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гуревич, Л. М. Слоистые интерметаллидные композиты и покрытия : монография / Л. М. Гуревич, В. Г. Шморгу, О. В. Слаутин, А. И. Богданов. – М. : Металлургиздат, 2016. – 346 с.
2. Шморгу, В. Г. Effect of Contact Melting Regime on Structure and Properties of Coatings of the Copper-Titanium

System / В. Г. Шморгу, О. В. Слаутин, Д. А. Евстропов // Metallurgist. – 2016. – Vol. 60, No. 5–6. – С. 635–640.

3. Formation of Ti-Cu-Based Intermetallic Coatings on the Surface of Copper During Contact Melting / В. Г. Шморгу, Л. М. Гуревич, О. В. Слаутин, В. Н. Арисова, Д. А. Евстропов // Metallurgist. – 2016. – Vol. 59, Issue 9–10 (January 2016). – С. 974–979.

4. Способы получения износостойких покрытий на основе купридов титана / В. Г. Шморгу, О. В. Слаутин, Д. А. Евстропов, В. П. Кулевич, Ю. И. Бондаренко // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 12 (175) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2015. – (Серия «Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении»). – С. 22–28.

5. Структура и фазовый состав диффузионной зоны на межслойной границе меди М1 со сплавами ВТ6 и ВТ20 / В. Г. Шморгу, В. Н. Арисова, О. В. Слаутин, Д. А. Евстропов, Ю. В. Миронова // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 12 (175) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2015. – (Серия «Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении»). – С. 15–22.

6. Структура и фазовый состав покрытия системы Ti-Cu, сформированного на поверхности титана [Электронный ресурс] / В. Г. Шморгу, О. В. Слаутин, В. Н. Арисова, Д. А. Евстропов, Ю. В. Миронова, В. П. Кулевич // Новости материаловедения. Наука и техника : электрон. науч.-техн. журнал. – 2015. – № 3. – С. 22–24. – Режим доступа : <http://materialsnews.ru>.

7. Рустем, С. Л. Оборудование термических цехов : учеб. для машиностроительных техникумов / С. Л. Рустем. – Москва : Машиностроение, 1971. – 287 с.