

УДК 621.762

## АНАЛИЗ УСЛОВИЯ ДОСТИЖЕНИЯ АДГЕЗИИ МЕЖДУ СЛОЯМИ БИМЕТАЛЛА ПРИ ПЛАКИРОВАНИИ ПРОКАТКОЙ

**Н.В. СЕЛИВОНЧИК, Ю.Л. БОБАРИКИН**

*Учреждение образования «Гомельский государственный  
технический университет имени П.О. Сухого»,  
Республика Беларусь*

**Введение и постановка задачи.** Процесс плакирования прокаткой стальной основы другими металлами позволяет получать композиционный многослойный материал, используемый в дальнейшем для изготовления подшипников скольжения, изделий с защитными покрытиями и т. п. Способ заключается в совместной прокатке стальной полосы и плакирующего порошкового покрытия, наносимого на поверхность основы в виде слоя, и в дальнейшей термообработке для спекания порошкового слоя и его окончательного закрепления на поверхности полосы. Материал основы должен быть менее пластичен, по сравнению с материалом покрытия для исключения растрескивания покрытия. Данный способ нанесения на металлическую основу покрытия плакированием или совместной пластической деформацией основы и порошкового плакирующего материала является достаточно перспективным вследствие высокой производительности и малой энергоемкости. Основной проблемой данного процесса является получение качественного соединения слоев, так как именно качество соединения во многом обеспечивает эксплуатационные характеристики получаемого материала.

Целью исследований являлось получение условия достижения адгезии между слоями, как основного критерия качества соединения.

Методика исследования состоит в проведении теоретических исследований для определения аналитической зависимости для условия достижения адгезии между слоями, и в экспериментальном подтверждении полученного условия в процессе плакирования прокаткой стали 08 кп покрытием из алюминиевого порошка ПАВЧ-1.

**Аналитическое определение условия адгезии.** В литературе [1-2] известно общее условие получения качественного соединения на стадии объемного взаимодействия для сварки с силовым воздействием различной степени интенсивности. Для достижения адгезии между слоями биметалла при плакировании прокаткой данное условие имеет вид:

$$t_{\partial} \geq t_a \geq t_p, \quad (1)$$

где  $t_{\partial}$  - время совместной пластической деформации или время перемещения контактных точек через зону деформации в процессе прокатки, с;  $t_a$  - время активации поверхности менее деформируемой основы в зоне соединения, с;  $t_p$  - время релаксации остаточных напряжений в покрытии, с.

Для практического использования условия (1) необходимо определить его составляющие параметры. Время совместной пластической деформации определяется по зависимости:

$$t_0 = \frac{l_0}{g_n}, \quad (2)$$

где  $l_0$  – длина очага деформации при прокатке, определяемая по зависимости  $l_0 = \sqrt{R\Delta h}$ , м, где  $R$  – радиус валков, м;  $\Delta h$  – абсолютное обжатие полосы, м;  $g_n$  – скорость процесса деформирования процесса прокатки, м/с.

Для определения времени активации используется зависимость [1]:

$$t_a = \frac{L \cdot b}{\dot{\varepsilon} \cdot S}, \quad (3)$$

где  $L$  – путь движения дислокации до барьера, равный  $\rho_g^{-1/2}$  ( $\rho_g$  – плотность дислокаций в зоне контакта материала менее пластичной основы,  $1/\text{м}^2$ ), м;  $b$  – вектор Бюргера для материала менее пластичной основы, м;  $\dot{\varepsilon}$  – скорость деформации металла в зоне соединения,  $\text{с}^{-1}$ ;  $S$  – изменение площади активного центра в месте выхода дислокаций к зоне соединения,  $\text{м}^2$ .

Время релаксации определяется согласно [1-2]:

$$t_p = t_0 \exp\left(\frac{U}{R \cdot T}\right), \quad (4)$$

где  $t_0$  – период собственных колебаний атомов около равноосного положения,  $t_0 = 10^{-13}$  с;  $R$  – универсальная газовая постоянная  $R = 8,31$  Дж/(моль·К);  $T$  – температура в очаге деформации, К;  $U$  – энергия активации процесса, контролирующего релаксацию внутренних напряжений, которая определяется согласно [3] для процессов, протекающих при  $T \leq 0,5T_{nl}$  как энергия термически активируемых процессов (поперечное скольжение, пересечение дислокаций, трение в решетке, обусловленное, силами Пайерлса), а для процессов при  $T > 0,5T_{nl}$  как энергия активации самодиффузии. Далее необходимо определить остальные параметры, входящие в (2)-(4).

Величина  $S$  определяется из [1]:

$$S = \pi \cdot r^2, \quad (5)$$

где  $r$  – радиус активного центра, м,

$$r^2 = \frac{1}{4\rho_g}. \quad (6)$$

Скорость деформации металла в зоне соединения можно определить:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\varepsilon_i}{t_0}, \quad (7)$$

где  $\varepsilon_i$  – интенсивность поверхностной деформации основы

$$\varepsilon_i = \frac{1}{\sqrt{3}} \gamma_i. \quad (8)$$

Для определения интенсивности сдвиговой деформации можно воспользоваться формулой, определяющей  $\gamma_i$  в декартовой системе координат [4].

$$\gamma_i = \frac{2}{3} \sqrt{(E_x - E_y)^2 + (E_y - E_z)^2 + (E_z - E_x)^2 + \frac{3}{2}(\gamma_{xy}^2 + \gamma_{yz}^2 + \gamma_{zx}^2)}, \quad (9)$$

где  $E_x, E_y, E_z$  – относительные удлинения;  $E_x + E_y + E_z = 0$ ;

$\gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$  – относительные сдвиги.

Для формулы (9) относительные удлинения и сдвиги определяются по формулам:

$$E_x = \frac{\partial U_x}{\partial x}; E_y = \frac{\partial U_y}{\partial y}; E_z = \frac{\partial U_z}{\partial z}, \quad (10)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial U_x}{\partial y} + \frac{\partial U_y}{\partial x}; \gamma_{yz} = \frac{\partial U_y}{\partial z} + \frac{\partial U_z}{\partial y}; \gamma_{zx} = \frac{\partial U_z}{\partial x} + \frac{\partial U_x}{\partial z}; \frac{\partial^2 E_x}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 E_z}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 \gamma_{zx}}{\partial x \partial z}, \quad (11)$$

где  $U_x, U_y, U_z$  – проекции перемещения точек, находящихся на контактной поверхности с инструментом в очаге деформации.

Таким образом, основной задачей для определения интенсивности сдвиговой деформации на контактной плоскости деформируемой основы является определение выражений перемещений точек поверхности, движущихся по этой плоскости в очаге деформации от начала пластической деформации и затем дальнейшее дифференцирование этих выражений. Интенсивность сдвиговой деформации показывает величину пластического сдвига в очаге деформации, где имеет место совместная пластическая деформация основы и плакирующего слоя. Анализируя перемещения точек на дуге контакта при прокатке (рис. 1), были получены зависимости [5]:

для зоны отставания:

$$U_x = -(1 - S_H) \cdot A \cdot R \cdot \cos\left(\frac{B}{2}\right) - \frac{A^2}{2(\alpha - \alpha_H)} \cdot R \cdot \cos\left(\frac{B}{2}\right), \quad (12)$$

$$U_z = -(1 - S_H) \cdot A \cdot R \cdot \sin\left(\frac{B}{2}\right) - \frac{A^2}{2(\alpha - \alpha_H)} \cdot R \cdot \sin\left(\frac{B}{2}\right);$$

для зоны опережения:

$$U_x = -(\alpha_H - \varphi) \cdot R \cdot \cos\left(\frac{C}{2}\right) - \frac{S_h \cdot D^2}{2\alpha_H} \cdot R \cdot \cos\left(\frac{C}{2}\right), \quad (13)$$

$$U_z = -(\alpha_H - \varphi) \cdot R \cdot \sin\left(\frac{C}{2}\right) - \frac{S_h \cdot D^2}{2\alpha_H} \cdot R \cdot \sin\left(\frac{C}{2}\right),$$

где  $A = \alpha - \arcsin \frac{x}{R}$ ;  $B = \alpha + \arcsin \frac{x}{R}$ ;  $C = \alpha_H + \arcsin \frac{x}{R}$ ;  $D = \alpha_H - \arcsin \frac{x}{R}$ ;  $S_H$  – отставание;  $S_h$  – опережение;  $R$  – радиус валков;  $\alpha$  – угол прокатки;  $\alpha_H$  – нейтральный угол.

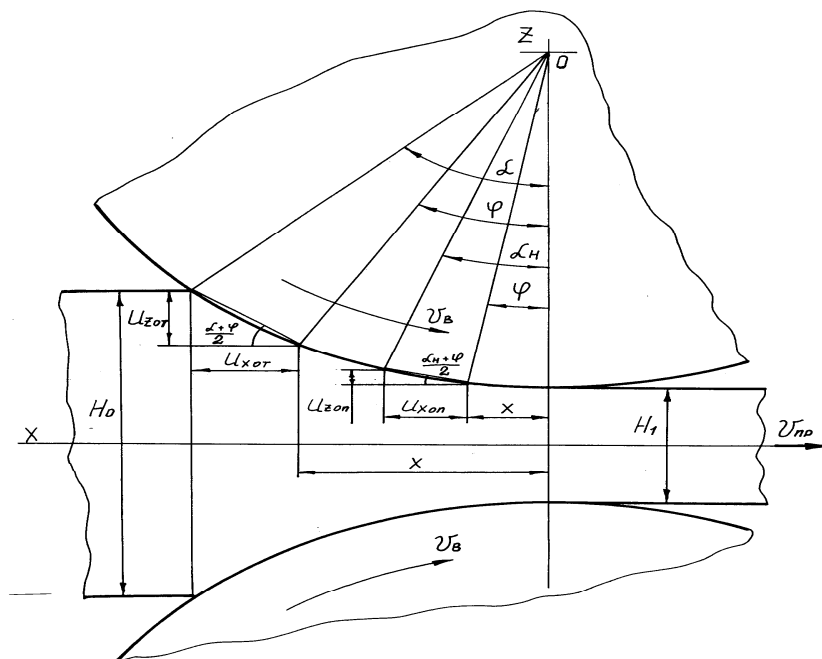


Рис. 1. Схема прокатки полосы к расчету величины интенсивности сдвиговой деформации

Для получения  $\gamma_i$  необходимо, используя (9), определить относительные удлинения и сдвиги путем дифференцирования. Из (10) и (12), (13) видно, что:  $E_y = \gamma_{xy} = \gamma_{yz} = 0$ ;  $E_x = E_z$ . Для определения  $E_x$  необходимо выражение для  $U_x$  в (12) продифференцировать по  $x$ . Произведя необходимые преобразования, получим: для зоны отставания:

$$E_x^{om} = (1 - S_H) \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{x^2}{R^2}}} \left[ \cos \frac{B}{2} - \frac{A}{2} \sin \frac{B}{2} + \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{x^2}{R^2}}} \frac{A}{(\alpha - \alpha_H)} \left[ \cos \frac{B}{2} - \frac{A}{2} \sin \frac{B}{2} \right] \right]; \quad (14)$$

для зоны опережения:

$$E_x^{on} = \frac{Sh}{\sqrt{1 - \frac{x^2}{R^2}}} \left[ 1 - \frac{\arcsin \frac{x}{R}}{\alpha_H} \right] + \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{x^2}{R^2}}} \left[ \cos \frac{C}{2} - \frac{D}{2} \sin \frac{C}{2} \right]. \quad (15)$$

Относительные сдвиги согласно [5]:

для зоны отставания:

$$\gamma_{zx}^{om} = (1 - S_H) \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{x^2}{R^2}}} \left[ \sin \frac{B}{2} - \frac{A}{2} \cos \frac{B}{2} + \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{x^2}{R^2}}} \frac{A}{(\alpha - \alpha_H)} \left[ \sin \frac{B}{2} - \frac{A}{2} \cos \frac{B}{2} \right] \right]; \quad (16)$$

для зоны опережения:

$$\gamma_{zx}^{on} = \frac{Sh}{\sqrt{1 - \frac{x^2}{R^2}}} \left[ 1 - \frac{\arcsin \frac{x}{R}}{\alpha_H} \right] + \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{x^2}{R^2}}} \left[ \sin \frac{C}{2} - \frac{D}{2} \cos \frac{C}{2} \right]. \quad (17)$$

Интенсивность сдвиговой деформации при прокатке для зоны отставания в соответствии с (9) будет равна:

$$\gamma_i^{om} = \frac{2}{3} \sqrt{4(E_x^{om})^2 + \frac{3}{2}(\gamma_{zx}^{om})^2}; \quad (18)$$

для зоны опережения:

$$\gamma_i^{on} = \frac{2}{3} \sqrt{4(E_x^{on})^2 + \frac{3}{2}(\gamma_{zx}^{on})^2}. \quad (19)$$

Значения компонентов, входящих в выражения для интенсивности сдвига тем больше, чем меньше отставание  $S_H$ , больше опережение  $S_h$  и меньше значение текущей координаты  $x$ , т. е. чем ближе рассматриваемая точка находится к выходу из валков. В соответствии с этим, при нанесении тонких плакирующих покрытий для наибольшего сдвига в зоне деформации необходимо увеличивать зону опережения, соответственно снижать зону отставания. При этом максимальная интенсивность сдвиговой деформации достигается на выходе из валков, где суммируется сдвиг, достигнутый в конце зоны отставания со сдвигом, полученным в конце зоны опережения, при этом для зоны отставания в формулу (18) необходимо подставлять  $x = R \cdot \sin \alpha_H$ , а в формулу (19)  $x = 0$ , т. е.

$$\gamma_i = \gamma_i^{om} + \gamma_i^{on}. \quad (20)$$

Температура металла в процессе формоизменения зависит от затрачиваемой на деформацию работы и интенсивности теплоотвода от заготовки в окружающее пространство.

Уравнение теплового баланса заготовки в процессах плакирования имеет следующий вид [6]:

$$Q_i = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5, \quad (21)$$

где  $Q_i$  – полная тепловая мощность деформации, Дж/с;

$Q_1$  – тепловая мощность, распределяемая на нагрев заготовки, Дж/с;

$Q_2$  – тепловая мощность, выносимая из очага деформации конвекцией, Дж/с;

$Q_3$  – тепловая мощность, передаваемая заготовкой инструменту, Дж/с;

$Q_4$  – тепловая мощность, выносимая из очага деформации в недеформируемую часть заготовки, Дж/с.

Мощность, затрачиваемая на нагрев заготовки, определяется по зависимости:

$$Q_1 = \frac{c\rho_0 V}{t_0} (T_M - T_0), \quad (22)$$

где  $c$  – удельная теплоемкость материала основы, Дж/(кг К);  $\rho_0$  – плотность материала основы, 1/м<sup>2</sup>;  $T_0$  – начальная температура, К;  $T$  – температура в очаге деформации, которая определяется как среднее арифметическое начальной температуры и температуры металла на выходе из очага деформации  $T = \frac{T_M + T_0}{2}$ , К;  $T_M$  – температура металла на выходе из очага деформации, К;  $V = blh_{cp}$  – объем очага деформации, м<sup>3</sup> (см. рис. 1);  $l$  – протяженность очага деформации,  $l = \sqrt{R\Delta h - \left(\frac{\Delta h}{2}\right)^2}$ , м,

$$h_{cp} = \frac{h_0 + h_1}{2}, \text{ м.}$$

Мощность, выносимая из очага деформации конвекцией, определяется по формуле:

$$Q_2 = c_1 \rho_1 S_k \vartheta_n (T - T_0), \quad (23)$$

где  $S_k = 2l(h_{cp} - l_n)$  – площадь пятна контакта очага деформации с воздухом, м<sup>2</sup> (см. рис. 1);  $c_1$  – удельная теплоемкость воздуха, Дж/(кг К);  $\rho_1$  – плотность воздуха, 1/м<sup>2</sup>.

Тепловая мощность, отдаваемая заготовкой инструменту, определяется по формуле:

$$Q_3 = c_2 \rho_2 \cdot S_k^1 (T - T_0), \quad (24)$$

где  $S_k^1 = 2bl_0$  – площадь пятна контакта очага деформации с инструментом, м<sup>2</sup> (см. рис. 1);  $b$  – ширина очага деформации, м;  $c_2, \rho_2$  – соответственно, удельная теплоемкость и плотность материала инструмента.

Тепловая мощность, выносимая из очага деформации в недеформируемую часть заготовки, определяется по формуле:

$$Q_4 = c\rho_0 S_k^{11} (T - T_0), \quad (25)$$

где  $S_k^{11} = b(h_0 + h_1)$  – площадь пятна контакта очага деформации с недеформируемой частью заготовки, м<sup>2</sup> (см. рис. 1).

Полная тепловая мощность деформации определяется через тепловую мощность пластической деформации и тепловую мощность сил контактного трения

$$Q_i = Q_T + Q_{\Pi}, \quad (26)$$

где  $Q_T$  – тепловая мощность сил контактного трения

$$Q_T = A_T \cdot \dot{\varepsilon}, \quad (27)$$

где  $A_T$  – работа сил контактного трения;  $\dot{\varepsilon}$  – скорость деформации, которая определяется по зависимости (6);  $Q_{II}$  – тепловая мощность пластической деформации

$$Q_{II} = A_{II} \cdot \dot{\varepsilon}, \quad (28)$$

где  $A_{II}$  – работа пластической деформации.

Величина  $A_{II}$  для процесса прокатки определяется по зависимости:

$$A_{II} = k \cdot l \cdot b \cdot h_{cp} \cdot \ln \left( 1 - \frac{\Delta h}{h_0} \right), \quad (29)$$

где  $k$  – постоянная пластичности.

Величину  $A_T$  для процесса прокатки можно определить по формуле:

$$A_T = 2 \cdot b \cdot f \cdot k \left[ \int_{l_n}^l \left( \cos \left( \arcsin \left( \frac{x}{R} \right) \right) \cdot U_x^{om} + \frac{x}{R} \cdot U_z^{om} \right) dx - \int_0^{l_n} \left( \cos \left( \arcsin \left( \frac{x}{R} \right) \right) \cdot U_x^{on} + \frac{x}{R} \cdot U_z^{on} \right) dx \right], \quad (30)$$

где  $f$  – коэффициент контактного трения;  $l_n$  – протяженность зоны опережения, м;  $U_x^{om}$ ,  $U_z^{om}$ ,  $U_x^{on}$ ,  $U_z^{on}$  – величины перемещений точек по контактной поверхности вдоль осей координат, полученные по зависимостям (12) и (13).

После подстановки уравнений (22)-(28) в уравнение (21) и соответствующих упрощений получим формулу для определения средней температуры в очаге деформации для прокатки:

$$T = T_0 + \frac{1}{2} \frac{t_d \cdot \dot{\varepsilon} \cdot A_p}{c \rho_0 h_{cp} b (l+1) + c_1 \rho_1 l g_n (h_{cp} - l_d) + c_2 \rho_2 b l_d}. \quad (31)$$

**Экспериментальная часть.** С целью подтверждения возможности практического использования полученного аналитического условия были проведены эксперименты. Они заключались в проведении плакирования стальной полосы 08 кп, шириной 15 мм и толщиной 1,5 мм, покрытием из порошка ПАВЧ-1 на прокатном стане с диаметром валков  $D=100$  мм. Режимы прокатки:  $g_n = 2,2$  мм/с,  $\varepsilon = 15\%$ . Полученный биметалл имел размеры: толщина основы 0,86 мм, покрытия 0,3 мм.

При металлографическом анализе зоны соединения (рис. 2) определено наличие отслоения покрытия от основы. Для анализа причин отслоения воспользовались условием (1) с учетом всех параметров, определяющих основные компоненты этого условия:

$$\rho = 2,75 \cdot 10^3 \text{ л/м}^2; c = 879,2 \frac{\text{Дж}}{(\text{кг} \cdot \text{К})}; U = 103,074 \cdot 10^3 \text{ Дж/моль};$$

$$\rho_1 = 1,29281 \text{ л/м}^2; c_1 = 100 \frac{\text{Дж}}{(\text{кг} \cdot \text{К})}; \rho_2 = 7,87 \cdot 10^3 \text{ л/м}^2; c_2 = 439,6 \frac{\text{Дж}}{(\text{кг} \cdot \text{К})}.$$

В результате получено:  $2,765 > 5,403 \cdot 10^{-3} < 2,427 \cdot 10^5$  с. То есть условие не выполняется.

Для устранения отслоения были проанализированы варианты достижения условия (1). Исключая замену материалов была проанализирована возможность изменения технологических режимов плакирования. Из всех возможных были выбраны варианты увеличения начальной температуры прокатки до  $0,2 T_{пл} = 405$  К,  $0,45 T_{пл} = 570$  К и  $0,9 T_{пл} = 867$  К металлопокрытия. Для первой температуры при  $U = 80,332 \cdot 10^3$  Дж/(кг·К), условие имеет вид:  $2,765 > 3,765 \cdot 10^{-4} < 6,112 \cdot 10^{-4}$ . Для второй температуры  $U = 97,67 \cdot 10^3$  Дж/(кг·К), условие имеет вид:  $2,765 > 5,007 \cdot 10^{-5} < 5,391 \cdot 10^{-5}$ . Для третьей температуры при  $U = 116,08 \cdot 10^3$  Дж/(кг·К), условие имеет вид:  $2,765 > 9,181 \cdot 10^{-6} > 6,955 \cdot 10^{-9}$ . Определено, что условие выполняется при нагреве зоны контакта металлов до температуры  $0,9$  – температуры плавления материала покрытия. Анализ зоны соединения после плакирования с нагревом до  $T_0 = 867$  К (рис. 3) показал наличие адгезии между покрытием и основой.

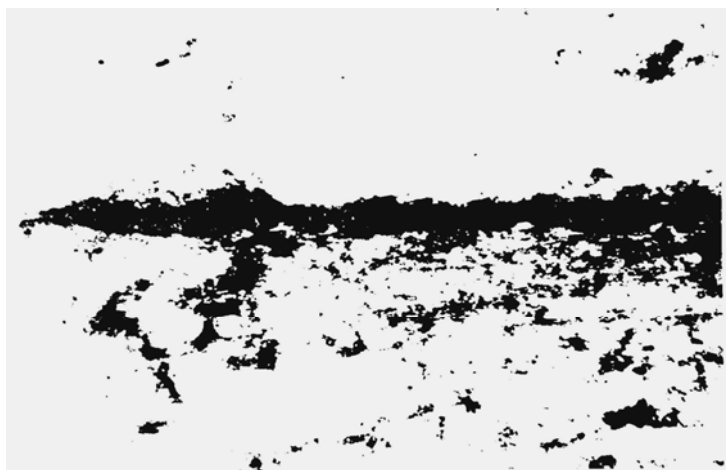


Рис. 2. Зона соединения стали 08 кп и алюминия без нагрева



Рис. 3. Зона соединения стали 08 кп и алюминия при  $T = 867$  К



При плакировании стали никелевым покрытием из порошка ПН-1 при тех же режимах прокатки визуально определено отслоение покрытия от основы. Для анализа причин отслоения воспользовались условием (1) с учетом всех параметров, определяющих основные компоненты условия:

$$\rho = 8,7 \cdot 10^{31} / \text{м}^2; c = 439,6 \frac{\text{Дж}}{(\text{кг} \cdot \text{К})}; U = 384,199 \cdot 10^3 \text{ Дж/моль}; T_0 = 1320 \text{ }^\circ\text{К};$$

$$\rho_1 = 1,29281 / \text{м}^2; c_1 = 100 \frac{\text{Дж}}{(\text{кг} \cdot \text{К})}; \rho_2 = 7,87 \cdot 10^{31} / \text{м}^2; c_2 = 439,6 \frac{\text{Дж}}{(\text{кг} \cdot \text{К})}.$$

В результате получено:  $2,765 > 2,082 \cdot 10^{-6} < 0,483 \text{ с}$ .

Для покрытия из хрома на основе порошка Х30 при тех же режимах прокатки так же визуально определено отслоение покрытия от основы. Для анализа причин отслоения воспользовались условием (1) с учетом всех параметров, определяющих основные компоненты условия:

$$\rho = 7,14 \cdot 10^{31} / \text{м}^2; c = 427 \frac{\text{Дж}}{(\text{кг} \cdot \text{К})}; U = 810 \cdot 10^3 \text{ Дж/моль}; T_0 = 1620 \text{ }^\circ\text{К};$$

$$\rho_1 = 1,29281 / \text{м}^2; c_1 = 100 \frac{\text{Дж}}{(\text{кг} \cdot \text{К})}; \rho_2 = 7,87 \cdot 10^{31} / \text{м}^2; c_2 = 439,6 \frac{\text{Дж}}{(\text{кг} \cdot \text{К})}.$$

В результате получено:  $2,765 > 1,593 \cdot 10^{-6} < 2,303 \cdot 10^9 \text{ с}$ . Условие не выполняется для покрытий на основе никелевого и хромового порошков. Проведенные экспериментальные исследования подтвердили возможность практического использования полученных аналитических зависимостей.

**Выводы.** Продемонстрирована возможность использования при расчете величин  $t_\partial$ ,  $t_a$ ,  $t_p$ , входящих в условие (1), по формулам (2)-(4), параметров, характеризующих применяемые материалы и технологические особенности процесса. Это позволяет при проектировании процессов плакирования учитывать свойства применяемых материалов и технологические режимы, а при необходимости – их корректировку с учетом условия достижения адгезии между слоями биметалла. Соблюдение полученного условия достигается варьированием технологических условий плакирования: интенсивностью деформации, скоростью деформации, геометрией очага деформации и начальной температурой соединяемых материалов.

### Список литературы

1. Каракозов Э.С., Орлова Л.М., Пешков В.В. Диффузионная сварка титана.- М.: Металлургия, 1977. – 272 с.
2. Бобарикин Ю.Л., Стрикель Н.И., Урбанович А.М. Основные закономерности плакирования стали прокаткой металлическими порошками //Материалы, технологии, инструменты. – 2000. – Т. 5, № 1. – С. 62-65.
3. Гарафало Ф. Законы ползучести и длительной прочности металлов и сплавов /Пер. с англ. – М.: Металлургия, 1968. – 304 с.
4. Сторожев М.В., Попов Е.А. Теория обработки металлов давлением. – М.: Машиностроение, 1971. – 424 с.

5. Бобарикин Ю.Л., Сычев Е.Г. Влияние сдвига на прочность схватывания твердых металлических тел, соединяемых совместной пластической деформацией. //Кузнечно-штамповочное производство. – 1993. – № 11. – С. 4-6.
6. Изотермическое деформирование металлов. /С.З. Фиглин, В.В. Бойцов, Ю.Г. Калпин, Ю.И. Калпин. – М.: Машиностроение, 1978. – 239 с.

*Получено 03.12.2002 г.*