

УДК 621.762

РАЗРАБОТКА КРИТЕРИЯ ПОЛУЧЕНИЯ СОЕДИНЕНИЯ ПОКРЫТИЯ С ОСНОВОЙ ПРИ ПЛАКИРОВАНИИ ОБРАТНЫМ ВЫДАВЛИВАНИЕМ

Н. В. СЕЛИВОНЧИК, Ю. Л. БОБАРИКИН⁺

Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого, пр. Октября, 48, 246029, г. Гомель, Беларусь.

Разработан и исследован критерий получения соединения между покрытием и основой при плакировании обратным выдавливанием, который достигается варьированием параметрами данного процесса. Использование предложенного критерия позволяет повысить эффективность процесса плакирования.

Введение

Процесс нанесения на металлическую основу покрытия плакированием или совместной пластической деформацией основы и порошкового плакирующего материала является достаточно перспективным вследствие высокой производительности и малой материало- и энергоёмкости. Проблемы надёжности соединения между слоем покрытия и основой достаточно актуальны, так как именно качество этого соединения, заключающееся в отсутствии отслоений покрытия от основы, во многом обеспечивает эксплуатационные характеристики получаемого материала. При плакировании материал основы должен быть менее пластичным по сравнению с материалом покрытия. Это исключает растрескивание покрытия. Поэтому интенсивность пластической деформации основы будет меньше, чем покрытия. В этом случае необходимо иметь достаточную активацию поверхности основы для ее соединения с покрытием. Так как покрытие более пластично относительно основы, то достаточным является релаксация внутренних напряжений в покрытии. А достижение релаксации внутренних напряжений в менее пластичной основе при этом не обязательно. Вследствие этого для получения качественного соединения необходимо выполнение условия:

$$t_d \geq t_a \geq t_p, \quad (1)$$

где t_d – время совместной пластической деформации или время перемещения материала через зону деформации; t_a – время активации поверхности менее деформируемой основы в зоне соединения; t_p – время релаксации остаточных напряжений в покрытии.

Время совместной пластической деформации

определяется по зависимости

$$t_d = l_d / \dot{\vartheta}_n, \quad (2)$$

где l_d – длина очага деформации при обратном выдавливании определяется по зависимости $l_d = d/2$, где d – диаметр пуансона; $\dot{\vartheta}_n$ – скорость процесса деформирования обратным выдавливанием.

Для определения времени активации используется зависимость [1]:

$$t_a = \frac{Lb}{\dot{\epsilon}S}, \quad (3)$$

где L – путь движения дислокации до барьера; b – модуль вектора Бюргерса для материала менее пластичной основы; $\dot{\epsilon}$ – скорость деформации металла в зоне соединения; S – изменение площади активного центра в месте выхода дислокаций к зоне соединения.

Время релаксации можно определить согласно [1] по зависимости:

$$t_p = \tau_0 \exp(U/kT), \quad (4)$$

где τ_0 – период собственных колебаний атомов около равноосного положения равная 10^{-13} ; R – универсальная газовая постоянная равная 8,31 Дж/(К·моль); T – температура в очаге деформации; U – энергия активации процесса, контролирующего релаксацию внутренних напряжений, которая определяется согласно методике в работе [2] для процессов, протекающих при $T \leq 0,5T_{пл}$ как энергия термически активируемых процессов (поперечное скольжение, пересечение дислокаций, трение в решетке, обусловленное силами Пайерлса), а для процессов при $T > 0,5T_{пл}$ как

⁺ Автор, с которым следует вести переписку.

энергия активации самодиффузии.

Определение параметров, входящих в условие получения соединения

Изменение площади активного центра S определяется по зависимости из работы [1]:

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

где r – радиус активного центра, который определяется по зависимости:

$$r^2 = 1/4\rho, \quad (6)$$

где ρ – плотность дислокаций в зоне контакта.

Скорость деформации металла в зоне соединения можно определить по зависимости:

$$\dot{\varepsilon} = \varepsilon_i / t_d, \quad (7)$$

где ε_i – интенсивность поверхностной деформации основы.

Величина ε_i определяется по зависимости:

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

где γ_i – интенсивность сдвиговой деформации.

Величина L определяется по зависимости из работы [1]:

$$L = \rho^{-1/2}. \quad (9)$$

Для количественной оценки величины сдвиговой деформации на поверхности основы необходимо определить величину интенсивности сдвиговой деформации γ_i на контакте с порошком в зоне деформации. При этом, в виду наличия тонкого порошкового покрытия между основой и инструментом, можно условно рассматривать непосредственный контакт инструмента с основой, т. е. не учитывать наличие тонкого порошкового слоя.

Для определения интенсивности сдвиговой деформации можно воспользоваться формулой из работы [2], определяющей γ_i в цилиндрической системе координат:

$$\gamma_i = \frac{2}{3} \sqrt{(E_\rho - E_\theta)^2 + (E_\theta - E_z)^2 + (E_z - E_\rho)^2} + \sqrt{\frac{3}{2} (\gamma_{\rho\theta}^2 + \gamma_{\theta z}^2 + \gamma_{z\rho}^2)}, \quad (10)$$

где E_ρ, E_θ, E_z – относительные удлинения, $E_\rho + E_z + E_\theta = 0$; $\gamma_{\rho\theta}, \gamma_{\theta z}, \gamma_{z\rho}$ – относительные сдвиги.

Для (10) относительные удлинения и сдвиги определяются по формулам:

$$E_\rho = \frac{\partial U_\rho}{\partial \rho}; E_\theta = \frac{U_\theta}{\rho}; E_z = \frac{\partial U_z}{\partial z}; \frac{\partial E_\theta}{\partial \rho} = \frac{E_\rho - E_\theta}{\rho}, \quad (11)$$

$$\gamma_{\rho\theta} = \frac{\partial U_\theta}{\partial \rho} - \frac{U_\theta}{\rho} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial U_\rho}{\partial \theta} = 0;$$

$$\gamma_{\theta z} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial U_z}{\partial \theta} + \frac{\partial U_\theta}{\partial z} = 0; \gamma_{z\rho} = \frac{\partial U_\rho}{\partial z} - \frac{\partial U_z}{\partial \rho},$$

где U_ρ, U_θ, 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 для перемещений точек поверхности, движущихся по этой плоскости в очаге деформации от начала пластической деформации и затем дальнейшее дифференцирование этих выражений.

Рассмотрим очаг деформации при обратном выдавливании (рис. 1).

Определим перемещения U_ρ и U_z для точек, лежащих на торце пуансона, при перемещении пуансона от начала деформирования.

Согласно рис. 1

$$U_z = z - h_0. \quad (12)$$

Перемещение U_ρ определим из предположения, что его величина прямо пропорциональна текущей координате ρ , т. е.

$$U_\rho = (z - h_0) \frac{r}{(R^2 - r^2)} \rho, \quad (13)$$

где h_0 – начальная высота цилиндрической заготовки.

Выражения (12) и (13) определяют величины перемещений точек в зоне деформации на торце пуансона от начала деформации до положений этих точек, определяемых координатами ρ и z . Оп-

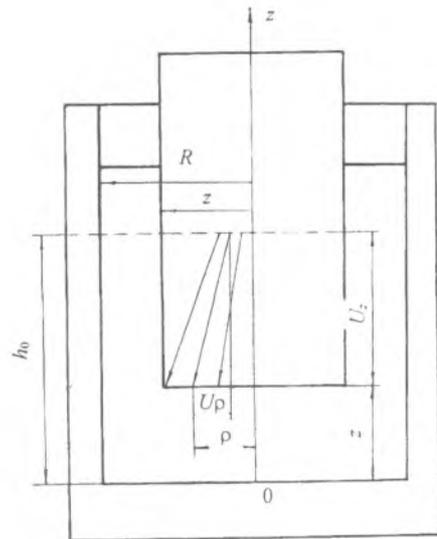


Рис. 1. Схема обратного выдавливания для расчета величины интенсивности сдвиговой деформации

ределив относительные удлинения и сдвиги согласно формулам (11) и подставив их в выражение (10), получим выражение для интенсивности сдвиговой деформации для обратного выдавливания

$$\gamma_i = \frac{2}{3} \sqrt{2(z-h_0)^2 \frac{r^2}{(R^2-r^2)^2} + \frac{3}{2} \frac{r^2}{(R^2-r^2)^2} \rho^2}. \quad (14)$$

Изменение температуры 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:

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 = Q_i, \quad (15)$$

где Q_1 – тепловая мощность, затрачиваемая на нагрев заготовки, равная

$$c\gamma V(T - T_0), \quad (16)$$

где c – удельная теплоемкость материала основы; γ – плотность материала основы; T_0 – начальная температура; T – средняя температура металла в очаге деформации; $V = (\pi d^2/4)h_d$ – объем очага деформации (рис. 1), где h_d – высота пластически деформируемой зоны при обратном выдавливании, находящаяся под торцом пуансона, которая определяется по зависимости из работы [4]:

$$h_d = d \sqrt{\frac{1-d/D}{3d/D(1+d/D)}}, \quad (17)$$

Q_2 – тепловая мощность, выносимая из очага деформации конвекцией равная

$$c\gamma S_k \theta_n (T - T_0), \quad (18)$$

где $S_k = 0$ – площадь пятна контакта очага деформации с воздухом (рис. 1);

Q_3 – тепловая мощность, отдаваемая заготовкой инструменту, равная

$$\alpha S_k^1 (T - T_0), \quad (19)$$

где $S_k^1 = \pi d^2/4$ – площадь пятна контакта очага деформации с инструментом (рис. 1); α – коэффициент теплоотдачи от очага деформации инструменту;

Q_4 – тепловая мощность, выносимая из очага деформации в недеформируемую часть заготовки, равная

$$\alpha S_k^{11} (T - T_0), \quad (20)$$

где $S_k^{11} = \pi d(h_d + d/4)$ – площадь пятна контакта очага деформации с недеформируемой частью заготовки (рис. 1);

Q_5 – тепловая мощность упругой деформации, равная

$$0,1Q_i; \quad (21)$$

Q_i – полная тепловая мощность деформации, ко-

торая определяется через тепловую мощность пластической деформации и тепловую мощность сил контактного трения:

$$Q_i = Q_T + Q_{\text{п}}, \quad (22)$$

где Q_T – тепловая мощность сил контактного трения, равная

$$A_T \dot{\epsilon}, \quad (23)$$

где A_T – работа сил контактного трения; $Q_{\text{п}}$ – тепловая мощность пластической деформации, равная

$$A_{\text{п}} \dot{\epsilon}, \quad (24)$$

где $A_{\text{п}}$ – работа пластической деформации.

Сумма работ пластической деформации $A_{\text{п}}$ и сил контактного трения A_T определит работу деформирующих сил при пластической деформации A_p , т. е.

$$A_p = A_{\text{п}} + A_T, \quad (25)$$

Величина $A_{\text{п}}$ для процесса обратного выдавливания определяется по зависимости

$$A_{\text{п}} = \iiint k \gamma^* \rho d\rho d\theta dz, \quad (26)$$

где k – постоянная пластичности; γ^* – интенсивность деформаций сдвига в деформируемом объеме.

Подставляя выражения для объема очага деформации и величины интенсивности деформаций сдвига в деформируемом объеме в формулу (26) получим выражение для работы $A_{\text{п}}$ при плакировании обратным выдавливанием:

$$A_{\text{п}} = \frac{\pi d^2}{4} h_d k \ln(1 - d^2/D^2) \sqrt{3}. \quad (27)$$

где D – наружный диаметр.

Для процессов с осесимметричным очагом деформации и плоским контактом величина A_T определится по зависимости:

$$A_T = \int_0^{2\pi} \int_0^{0,5d} \tau_k u_{\rho} \rho d\rho d\theta = 2\pi \int_0^{0,5d} \tau_k u_{\rho} \rho d\rho, \quad (28)$$

где τ_k – величина контактного касательного напряжения.

Величину контактного касательного напряжения τ_k определим согласно положению Э. Зибеля:

$$\tau_k = 2fk, \quad (29)$$

где f – коэффициент контактного трения.

Таким образом величина A_T определяется для процесса обратного выдавливания по зависимости:

$$A_T = \frac{\pi}{6} fk(z-h_0) \left(\frac{r}{R^2-r^2} \right) d^3. \quad (30)$$

Подставляя выражения (16) – (30) в (15), после элементарных преобразований получим формулу для определения температуры в очаге де-

формации:

$$T = T_0 + \frac{3,6A_p \dot{\epsilon}}{\pi d [c\gamma h_d d + \alpha(2d + 4h_d)]} \quad (31)$$

Экспериментальное исследование процесса

Экспериментальные исследования выполнялись для процесса плакирования обратным выдавливанием без нагрева. Суть способа заключается в нанесении углубления на торцевой поверхности цилиндрической плакируемой заготовки, куда закладывается порция порошкового материала, затем заготовку со стороны порошка продавливают пуансоном. Плакирующая порошковая вставка распределяется по образующейся внутренней цилиндрической поверхности образца в виде плакирующего покрытия. Таким образом из цилиндрической заготовки образуется полое изделие с донышком с внутренним покрытием из порошкового материала. Качество получаемых плакированных соединений исследовалось методом внешнего осмотера, методом электронной микроскопии шлифов на электронном микроскопе Stereo-Scan-200. В качестве основы использовалась сталь 20 в отожженном состоянии в виде цилиндрических заготовок диаметром 8 и высотой 10 мм. В качестве порошков, применяемых для формирования плакирующих покрытий, использовались порошки никеля ПН-1, алюминия ПАВЧ-1, олова ПО-2.

Процесс плакирования осуществлялся на гидравлической испытательной машине с максимальным усилием 500 кН с помощью специально разработанного и изготовленного устройства. Стальные заготовки обрабатывали обратным выдавливанием с одновременным плакированием внутренней полости диаметром 6 мм. При проведении исследований фиксировались усилия деформации при плакировании. Внешний вид плакированных слоев изучался визуально.

Образцы, имеющие форму цилиндрических стаканов с внутренним покрытием, распиливались пополам и исследовались на микроскопе. В результате выявлено, что устойчивой сплошностью по всей длине поверхности обладают покрытия алюминия, олова (рис. 2, а, б). Никелевое покрытие (рис. 2, в) имеет значительные повреждения, а

участки видимого покрытия присутствуют только на некоторых местах. Проведенные эксперименты позволили провести анализ возможности соединения железной основы с покрытиями из металлических порошков. Для подтверждения теоретических данных был проведен расчет по критерию получения соединения при плакировании, который показал, что для покрытий условие (1) имеет следующий вид: для олова $1,3626 \geq 0,014 \geq 2,963 \cdot 10^{-9}$; для алюминиевого покрытия $1,3626 \geq 0,014 \geq 7,005 \cdot 10^{-6}$; для покрытия из никеля $1,3626 \geq 0,014 \geq 1,321 \cdot 10^{14}$. Из результатов вычислений следует, что разработанный критерий выполняется для оловянного и алюминиевого покрытий и не выполняется для никелевого покрытия. Это подтверждается микроструктурой зон соответствующих соединений.

Заключение

Таким образом, полученное условие качественного соединения позволит повысить эффективность исследуемого процесса за счет правильного назначения режимов плакирования, удовлетворяющих данному условию (1), параметры которого определяются по формулам (2), (3) и (4). Данное условие достигается путем варьирования термомеханических параметров, таких как скорость деформирования, начальная температура, геометрия очага деформации.

Обозначения

t_d – время совместной пластической деформации или время перемещения контактных точек через зону деформации; t_a – время активации поверхности менее деформируемой основы в зоне соединения; t_p – время релаксации остаточных напряжений в покрытии; l_d – длина очага деформации при обратном выдавливании; d – диаметр пуансона; $\dot{\epsilon}_n$ – скорость процесса деформирования обратным выдавливанием; L – путь движения дислокации до барьера; b – модуль вектора Бюргерса для материала менее пластичной основы; $\dot{\epsilon}$ – скорость деформации металла в зоне соединения; S – изменение площади активного центра в месте выхода дислокаций к зоне соединения; τ_0 – период собственных колебаний атомов около равноосно-



Рис. 2. Микроструктура зоны соединения стальной основы: а — с оловянным порошковым покрытием (справа) $\times 2550$ и б — с алюминиевым порошковым покрытием (справа) $\times 2550$; в — с никелевым порошковым покрытием (справа) $\times 5340$

го положения; R – универсальная газовая постоянная; T – температура в очаге деформации; U – энергия активации процесса, контролирующего релаксацию внутренних напряжений; r – радиус активного центра; ρ – плотность дислокаций в зоне контакта; ε_i – интенсивность поверхностной деформации основы; γ_i – интенсивность сдвиговой деформации; E_ρ , E_θ , E_z – относительные удлинения; $\gamma_{\rho\theta}$, $\gamma_{\theta z}$, $\gamma_{z\rho}$ – относительные сдвиги; U_ρ , U_θ , U_z – проекции перемещения точек, находящихся на контактной поверхности с инструментом в очаге деформации; h_0 – начальная высота цилиндрической заготовки; c – удельная теплоемкость материала основы; γ – плотность материала основы; T_0 – начальная температура; V – объем очага деформации; h_d – высота пластически деформируемой зоны при обратном выдавливании, находящаяся под торцом пуансона; Q_1 , Q_2 , Q_3 , Q_4 , Q_5 , Q_6 , Q_7 , Q_{II} – мощность, затрачиваемая на нагрев заготовки; выносимая из очага деформации конвекцией; отдаваемая заготовкой инструменту; выносимая из очага деформации в недеформируемую часть заготовки; упругой деформации;

полная; сил контактного трения; пластической деформации соответственно, S_k , S_k^1 , S_k^{11} – площадь пята на контакте очага деформации с воздухом; с инструментом; с недеформируемой частью заготовки соответственно; α – коэффициент теплоотдачи от очага деформации инструменту; A_T – работа сил контактного трения; A_{II} – работа пластической деформации; k – постоянная пластичности; γ_i^* – интенсивность деформаций сдвига в деформируемом объеме; D – наружный диаметр; τ_k – величина контактного касательного напряжения; f – коэффициент контактного трения.

Литература

1. Каракозов Э. С., Орлова Л. М., Пешков В. В. Диффузионная сварка титана. М.: Металлургия (1977)
2. Гарафало Ф. Законы ползучести и длительной прочности металлов и сплавов. М.: Металлургия (1968)
3. Громов А. В. Теория обработки металлов давлением. М.: Металлургия (1978)
4. Сторожев М. В., Попов Е. А. Теория обработки металлов давлением. М.: Машиностроение (1977)

Selivonchik N. V., Bobarikin J. L.

Criterion of obtaining coating-base joint by indirect extrusion cladding.

The criterion of obtaining a joint between the cladding coating and the base being coated by indirect extrusion cladding is elaborated and investigated here (in this paper). The criterion is achieved by the variation of the process parameters and allows to increase the efficiency of the process of cladding.

Поступила в редакцию 20.12.2001.

© Н. В. Селивончик, Ю. Л. Бобарикин, 2002.