

УДК 621.762

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ СДВИГОВОЙ ДЕФОРМАЦИИ И ТЕМПЕРАТУРЫ В ОЧАГЕ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ПЛАКИРОВАНИИ ОБРАТНЫМ ВЫДАВЛИВАНИЕМ

Ю. Л. БОБАРИКИН⁺, В. Ф. БУРЕНКОВ, Н. В. ИНОЗЕМЦЕВА

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

Теоретически определены интенсивность сдвиговой деформации в зоне контакта и температура в очаге деформации. Методом делительных сеток проведена экспериментальная проверка величины интенсивности сдвиговой деформации в процессе обратного выдавливания и определена температура в очаге деформации.

Введение и постановка задачи

Способы нанесения металлических порошковых покрытий на металлическую основу в технологиях плакирования методом совместной пластической деформации основы и порошка являются высокопроизводительными и ресурсосберегающими.

Для анализа процесса плакирования необходимо иметь расчетные значения интенсивности поверхностной сдвиговой деформации основы y_i и средней объемной температуры в зоне деформации T [1]. Эти параметры влияют на степень деформации покрытия и основы, следовательно, на их свойства, на качество соединения, на энерго-силовые параметры процесса. В этой связи является актуальным определение их значений.

Теоретическое исследование

Ввиду наличия между инструментом и основной тонкого плакирующего слоя, составляющего 1...5% толщины металлической основы, при теоретическом определении y_i и T можно условно рассматривать непосредственный контакт инструмента с основой.

Для y_i при обратном выдавливании можно воспользоваться формулой из [2], определяющей эту величину в цилиндрической системе координат:

$$y_i = \frac{2}{3} \sqrt{(E_p - E_\theta)^2 + (E_\theta - E_z)^2 + (E_z - E_p)^2 + \frac{1}{2}(\gamma_{z\rho}^2 + \gamma_{\rho\theta}^2 + \gamma_{\theta z}^2)}. \quad (1)$$

Для формулы (1) относительные удлинения и сдвиги определяются по формулам:

$$E_p = \frac{\partial U_\rho}{\partial \rho}; \quad E_\theta = \frac{U_\theta}{\rho}; \quad E_z = \frac{\partial U_z}{\partial z}; \quad \frac{\partial E_\theta}{\partial \rho} = \frac{E_p - E_\theta}{\rho}, \quad (2)$$

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

$$\gamma_{\theta z} = \frac{\partial U_\theta}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial U_z}{\partial \theta} = 0. \quad (3)$$

Таким образом, основной задачей при определении интенсивности сдвиговой деформации на контактной поверхности деформируемой основы является нахождение уравнений для перемещений точек поверхности, движущихся по этой поверхности в очаге деформации от ее начала до окончания, и затем дальнейшее их дифференцирование.

Для определения интенсивности сдвиговой деформации на контактной поверхности под торцом пуансона при обратном выдавливании рассмотрим очаг деформации (рис. 1).

Определим перемещение U_ρ для точек, лежащих на дуге контакта:

$$U_\rho = R\varphi \cos \varphi. \quad (4)$$

При максимальных сдвиговых деформациях величина параметра R определяется по формуле:

$$R = \frac{d}{2} \sqrt{2}, \quad (5)$$

где d – диаметр пуансона, м

Угол φ определяется через величину текущей

⁺ Автор, с которым следует вести переписку

координаты ρ :

$$\varphi = \arcsin \frac{\rho}{R}. \quad (6)$$

Текущая координата ρ связана с координатой z зависимостью:

$$\rho = z \frac{1}{\operatorname{tg}(C)}, \quad (7)$$

$$\text{где } C = \left(\arcsin \left(\frac{\rho}{d/\sqrt{2}} \right) \right)$$

Подставляя (5), (6) и (7) в (4) получим выражение для перемещения U_p :

$$U_p = \frac{d}{2} \sqrt{2} \arcsin(B) \cos(\arcsin(B)). \quad (8)$$

Определим относительные удлинения и сдвиги, согласно формулам (2, 3). В результате получим:

$$E_p = \frac{d}{2} \sqrt{2} \frac{z}{\sqrt{\left(d^2/2 \operatorname{tg}^2(C) - z^2 \right) \left(d^2/2 - \rho^2 \right)}} \left(\frac{B}{\cos(C)} - \frac{d\sqrt{2}}{2\rho} \right). \quad (9)$$

$$E_\theta = \frac{d}{2} \frac{\sqrt{2}B}{\rho} \cos(C). \quad (10)$$

$$\gamma_{pz} = \left(\frac{d\sqrt{2}}{2} \frac{d\sqrt{2} \cos(C) - 2\rho B}{\sqrt{\left(d^2 \operatorname{tg}^2(C) - 2z^2 \right)}} + \frac{d\sqrt{2}z(2\rho + Bd \cos(C)\sqrt{2})}{2\rho \cos(C) \sqrt{\left(d^2 \operatorname{tg}^2(C) - 2z^2 \right) \left(d^2 - 2\rho^2 \right)}} \right), \quad (11)$$

$$\text{где } B = \arcsin \left[\frac{z}{d/\sqrt{2} \operatorname{tg}(C)} \right].$$

$$\gamma_{\rho\theta} = \gamma_{\theta z} = 0. \quad (12)$$

Из условия $E_p + E_\theta + E_z = 0$ определяем, что $E_z = -E_\theta - E_p$.

Для получения γ_i при обратном выдавливании совместно решаются уравнения (1), (9-12).

Изменение температуры в очаге деформации 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:

$$Q_i = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 \quad (13)$$

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.

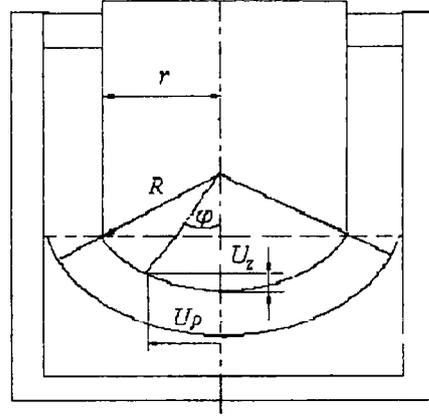


Рис. 1. Схема обратного выдавливания к расчету величины интенсивности контактной сдвиговой деформации

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

$$Q_i = Q_T + Q_n \quad (14)$$

где Q_T – тепловая мощность сил контактного трения

$$Q_T = A_T \dot{\epsilon} \quad (15)$$

где A_T – работа сил контактного трения, Дж; $\dot{\epsilon}$ – скорость деформации, s^{-1} ; Q_n – тепловая мощность пластической деформации.

$$Q_n = A_n \dot{\epsilon} \quad (16)$$

где A_n – работа пластической деформации, Дж.

Тепловая мощность, распределяемая на нагрев заготовки, определяется по формуле:

$$Q_1 = \frac{c\gamma V}{t_d} (T_M - T_0) \quad (17)$$

где c – удельная теплоемкость материала основы Дж/(кг·К); γ – плотность материала основы, kg/m^3 ; T_0 – начальная температура, К; T_M – температура металла на выходе из очага деформации, 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; $V = \frac{\pi d^2}{4} h_d$ – объем очага деформации при обратном выдавливании

вании, m^3 , $h_0 = d \sqrt{\frac{1 - (d/D)}{3d/D(1 + (d/D))}}$ - высота пласти-

чески деформируемой зоны [2], мм t_0 - время совместной пластической деформации или время перемещения контактных точек через зону деформации в процессе плакирования, с.

Тепловая мощность, выносимая из очага деформации конвекцией, определяется по формуле:

$$Q_2 = c_1 \gamma_1 S_k v_n (T - T_0) \quad (18)$$

где $S_k = 0$ - площадь пятна контакта очага деформации с воздухом, m^2 ; $c_1 \gamma_1$ - соответственно удельная теплоемкость и плотность воздуха; v_n - скорость деформирования, м/с.

Тепловая мощность, отдаваемая заготовкой инструмента, определяется по формуле:

$$Q_3 = c_2 \gamma_2 S_k^I v_n (T - T_0) \quad (19)$$

где $S_k^I = \pi d^2 / 4$ - площадь пятна контакта очага деформации с инструментом, m^2 ; $c_2 \gamma_2$ - соответственно удельная теплоемкость и плотность материала инструмента.

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

$$Q_4 = c \gamma S_k^{II} v_n (T - T_0) \quad (20)$$

где $S_k^{II} = \pi d (h_0 + d/4)$ - площадь пятна контакта очага деформации с недеформируемой частью заготовки, m^2 .

Подставляя (14-19) в (13) и после преобразований получим выражение для температуры в очаге деформации при обратном выдавливании:

$$T = T_0 + \frac{4t_0(A_T + A_n)\dot{\epsilon}}{\pi d(c\gamma(t_0 dv_n + 2h_0(2t_0 v_n + d)) + c_2 \gamma_2 t_0 dv_n)} \quad (21)$$

Экспериментальное исследование

Исследование проводили на установке (рис. 2). На внутреннюю полость алюминиевого образца наносилось порошковое оловянное покрытие, служащее внутренним припойным слоем на изделии. Исходные размеры цилиндрической алюминиевой заготовки: диаметр 40 мм, высота 40 мм, максимальная величина хода пуансона - 30 мм, диаметр пуансона 20 мм. Толщина плакирующего оловянного слоя 0,1 мм.

Для экспериментального исследования распределения деформации применялся метод координатной сетки [3]. Данный метод заключался в том, что на одну из половин составного образца на плоскости реза была нанесена координатная сетка механическим путем. После деформации по изменению размеров ячеек координатной сетки по срав-

нению с первоначальными определяется степень деформации в различных точках деформируемого образца. Для оценки степени формоизменения элемента деформируемого образца в теории пластичности применяется интенсивность деформации, которая представлена в следующем виде [4]:

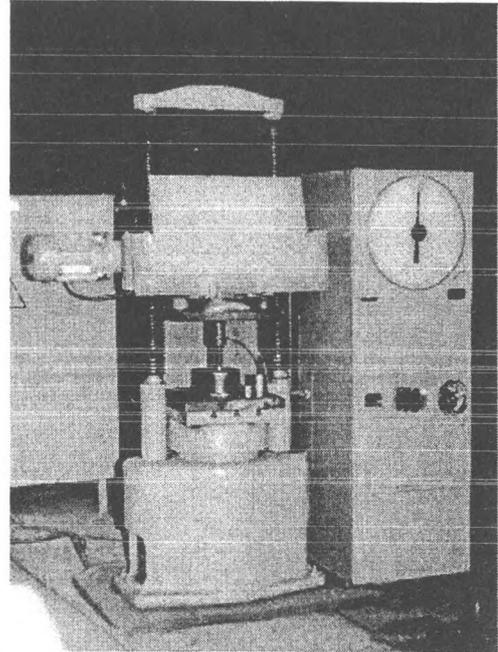


Рис. 2. Общий вид установки для плакирования металлов порошковыми покрытиями с помощью процесса обратного выдавливания

$$\epsilon_i = \frac{2}{\sqrt{6}} \sqrt{\epsilon_1^2 + \epsilon_2^2 + \epsilon_3^2}, \quad (22)$$

где $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ - главные деформации.

Величину главных деформаций можно определить по зависимостям:

$$\epsilon_1 = \ln(a/a_1), \quad \epsilon_2 = \ln(b/b_1), \quad (23)$$

где a, b - размеры ячейки координатной сетки до деформации, мм; a_1, b_1 - размеры ячейки координатной сетки после деформации, мм.

Третья главная деформация находится из условия постоянства объема при пластической деформации, т.е.

$$\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 = 0, \quad \text{или} \quad -\epsilon_3 = \epsilon_1 + \epsilon_2. \quad (24)$$

Интенсивность сдвиговой деформации определяется по формуле:

$$\gamma_i = \epsilon_i \sqrt{3} \quad (25)$$

На рис 3, а представлена половина образца из алюминия, на плоскость резания которой была нанесена координатная сетка с размером ячеек $a = 2,5$ мм, $b = 2,5$ мм. После деформации обратным выдавливанием образец имел вид, представ-

ленный на рис 3, б. Размеры ячейки в зоне окончания формирования покрытия (точка А) были следующие: $a_1 = 3,9$ мм, $b_1 = 1,2$ мм.

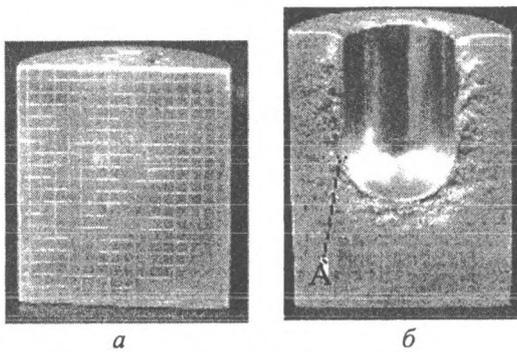


Рис. 3. Алюминиевый образец с координатной сеткой: а) до деформации; б) после деформации

Согласно формулам (23–24) главные деформации равны:

$$\varepsilon_1 = -0,444685821, \quad \varepsilon_2 = 0,733969175,$$

$$\varepsilon_3 = -0,2892833538.$$

Тогда согласно (22) и (25): $\varepsilon_i = 0,7394327$,

$$\gamma_i = 1,2807$$

Был проведен теоретический расчет интенсивности сдвиговой деформации в указанной зоне, согласно формулам (1–12) по следующим данным:

$$d = 20 \text{ мм}, R = 40 \text{ мм}, \rho = r = 10 \text{ мм}, z = r(\sqrt{2} - 1) = 4,142 \text{ мм}.$$

В результате, согласно (1) получено $y_i = 1,241$.

Погрешность расчета в сравнении с экспериментальными данными составила 3,1%.

Для измерения температуры использовались три хромель-копелевые термопары, зачеканенные через латунные полусферические вставки радиусом 1 мм в торцевую часть прошивного пуансона, проведенные внутри его и присоединенные к регистрирующей температуру аппаратуре, погрешность измерения которой $\pm 0,5$ °С.

С учетом относительно малой толщины получаемого слоя измерение температур в зоне деформации проводили без применения оловянного порошка, технологически выполняющего роль смазки.

Результаты исследований приведены на рис. 4.

Анализ зависимостей (рис. 4) указывает на появление регистрируемого тепловыделения при скорости деформирования свыше 0,18 мм/с. Интенсивность роста температуры при плакировании увеличивается по мере перемещения пуансона.

Анализ зависимости (рис. 4) также показывает на увеличение тепловыделения с ростом скорости деформации.

Интенсивность роста температуры на инструменте при деформации в зависимости от перемещения пуансона определялась так:

$$I = \Delta T / \Delta l, \quad (26)$$

где ΔT – абсолютное увеличение температуры, Δl – величина перемещения пуансона.

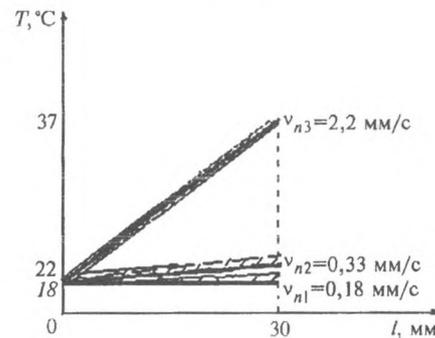


Рис. 4. Зависимость температуры в зоне соединения T от величины перемещения пуансона l при разных скоростях деформирования v_n

Из рис. 4 экспериментальные значения интенсивности роста температуры на инструменте равны для трех значений скоростей деформирования:

$$I_{(v_{n1})}^{\varepsilon} = \frac{\Delta T_1}{\Delta l} = \frac{(19 - 18) + 273}{0,03} = 0,9133 \cdot 10^4 \frac{\text{К}}{\text{м}};$$

$$I_{(v_{n2})}^{\varepsilon} = \frac{\Delta T_2}{\Delta l} = \frac{(22 - 18) + 273}{0,03} = 0,9233 \cdot 10^4 \frac{\text{К}}{\text{м}};$$

$$I_{(v_{n3})}^{\varepsilon} = \frac{\Delta T_3}{\Delta l} = \frac{(37 - 18) + 273}{0,03} = 0,9733 \cdot 10^4 \frac{\text{К}}{\text{м}}.$$

Для условий эксперимента проведен теоретический расчет температуры по формуле (21), с целью проверки согласования теории и эксперимента. На рис. 4 указаны поля доверительных интервалов на экспериментальных зависимостях, в которых находятся расчетные значения температур.

В расчетах были приняты следующие исходные данные, характеризующие также условия эксперимента:

$$y_{\max} = 1,434; b = 2,86 \cdot 10^{-10} \text{ м}; v_{3\sigma} = 5 \cdot 10^3 \text{ м/с};$$

$$l = 1 \cdot 10^{-3} \text{ м}; v_{n1} = 0,18 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}$$

$$v_{n2} = 0,33 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}; v_{n3} = 2,2 \cdot 10^{-3} \text{ м/с};$$

$$c = 222 \text{ Дж/(кг·К)}; \gamma = 7,2 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^2;$$

$$k = 1,3805 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}; d = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}; D = 4 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$c_1 = 436,9 \text{ Дж/(кг·К)}; \gamma_1 = 7,87 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^2;$$

$$c_2 = 879,2 \text{ Дж/(кг·К)};$$

$$\gamma_2 = 2,75 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^2; T_0 = 291 \text{ К}$$

Расчет дал следующие значения интенсивности роста температуры для трех значений скоростей деформирования:

$$I_{(v_{n1})}^T = 0,9156 \cdot 10^4 \frac{\text{К}}{\text{М}}; I_{(v_{n2})}^T = 0,9233 \cdot 10^4 \frac{\text{К}}{\text{М}};$$

$$I_{(v_{n3})}^T = 0,98 \cdot 10^4 \frac{\text{К}}{\text{М}}.$$

Сравнительный анализ значений $I_{(v_{ni})}^{\partial}$ и $I_{(v_{ni})}^T$ показал, что погрешность расчета составила около 6%, что подтверждает обоснованность использования формулы (21) для определения температуры в зоне деформации и соответствует требованиям инженерных расчетов.

Выводы

В результате аналитических исследований получена зависимость для величины интенсивности сдвиговой деформации на контактной поверхности в зоне окончания формирования покрытия при обратном выдавливании, проверенная экспериментально с использованием метода координатных сеток. Теоретически определена величина температуры в очаге деформации при обратном выдавливании; экспериментальная проверка температуры с помощью термопар, показала правильность теоретического определения. Таким образом, полученные зависимости могут быть использованы практически.

Обозначения

t_0 – время совместной пластической деформации или время перемещения контактных точек через зону деформации в процессе плакирования, с; y_i – интенсивность сдвиговой контактной деформации; E_p, E_θ, E_z – относительные удлинения в цилиндрической системе координат; $\gamma_{p\theta}, \gamma_{\theta z}, \gamma_{zp}$ – относительные сдвиги в цилиндрической системе координат, U_p, U_θ, U_z – проекции перемещения точек, находящихся на контактной поверхности с инструментом в очаге деформации в цилиндрической системе координат; R – радиусный параметр очага деформации, м; φ – угол, определяющий положение точки на дуге контакта,

рад; α – угол радиусной зоны инструмента, рад; A – константа материала; Q_i – полная тепловая мощность деформации, которая определяется через тепловую мощность пластической деформации и тепловую мощность сил контактного трения, Дж/с; Q_1 – тепловая мощность, затрачиваемая на нагрев заготовки, Дж/с; Q_2 – тепловая мощность, выносимая из очага деформации конвекцией, Дж/с; Q_3 – тепловая мощность, отдаваемая заготовкой инструменту, Дж/с; Q_4 – тепловая мощность, выносимая из очага деформации в недеформируемую часть заготовки, Дж/с; Q_T – тепловая мощность сил контактного трения, Дж/с; A_T – работа сил контактного трения, Дж; $Q_{\text{п}}$ – тепловая мощность пластической деформации, Дж/с; $A_{\text{п}}$ – работа пластической деформации, Дж; $\dot{\epsilon}$ – скорость деформации, с⁻¹; v_n – скорость деформирования, м/с; c – удельная теплоемкость материала основы Дж/(кг·К); γ – плотность материала основы, кг/м³; T_0 – начальная температура, К; T_M – температура металла на выходе из очага деформации, К; V – объем очага деформации, м³; S_k – площадь контакта очага деформации с воздухом, м²; c_1 – удельная теплоемкость, Дж/(кг·К); γ_1 – плотность воздуха, кг/м³; S_k^1 – площадь контакта очага деформации с инструментом, м²; c_2 – удельная теплоемкость, Дж/(кг·К); γ_2 – плотность материала инструмента, кг/м³; S_k^{11} – площадь контакта очага деформации с недеформируемой частью заготовки, м²; d – внутренний диаметр прошитого отверстия, м; h_d – высота пластически деформируемой зоны при обратном выдавливании, находящаяся под торцом пуансона.

Литература

1. Бобарикин Ю. Л., Селивончик Н. В., Швецов А. Н. Аналитическое определение времени активации контактных поверхностей при плакировании // Кузнечно-штамповочное производство. – 2002, № 11 13–16
2. Сторожев М. В., Попов Е. А. Теория обработки металлов давлением. – М.: Машиностроение. – 1977
3. Дель Г. Д., Новиков Н. А. Метод делительных сеток. – М.: Машиностроение. – 1979
4. Лабораторный практикум по теории, машинам и технологии обработки металлов давлением. Под общ. ред. В. П. Северденко. – Мн.: Вышэйшая школа. – 1975

Yu.L. Bobarikin, V.F. Burenkov, N.V. Inozemtseva

Determination of temperature and of shear deformation intensity in deformation site at cladding by reverse extrusion

The intensity of shear deformation in the contact zone and the temperature in the site of deformation are determined. The value of shear deformation intensity is verified experimentally by the method of dividing grids as applied to the process of reverse extrusion. The temperature in the deformation site was measured by thermocouples.

Поступила в редакцию 30.09.2004.