

УДК 621.777:621.79

НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ОЧАГА ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ПЛАКИРОВАНИИ ПРОШИВКОЙ

Ю. Л. БОБАРИКИН, В. Ф. БУРЕНКОВ

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

Введение

Процесс получения металлических покрытий на внутренних цилиндрических поверхностях металлических заготовок с помощью плакирования прошивкой отличается высокой производительностью, хорошей адгезией покрытия к заготовке, малой шероховатостью поверхности покрытия [1], [2]. Под плакированием понимается нанесение металлических покрытий на металлическую заготовку методом их совместной пластической деформации. Совместная пластическая деформация может осуществляться с помощью различных способов обработки металлов давлением, в том числе обратным выдавливанием или прошивкой [3]–[5].

Процесс плакирования прошивкой заключается в том, что в заготовке, помещенной в жесткий контейнер, деформирующим инструментом (пуансоном) выдавливается лунка заданной формы и размеров (рис. 1). Эту первую стадию плакирования прошивкой называют получением лунки. Форма лунки определяется формой рабочей поверхности пуансона, ее глубина соответствует объему плакирующего слоя с учетом коэффициента использования плакирующего материала. Первая стадия плакирования прошивкой характеризуется внедрением пуансона в заготовку на глубину h_n , не превышающую половину диаметра пуансона d .

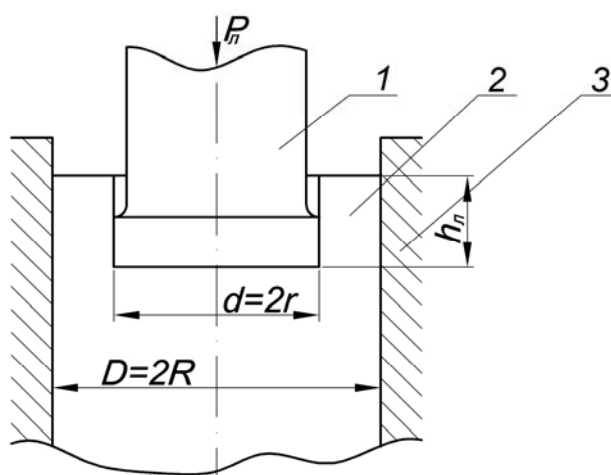


Рис. 1. Схема первой стадии плакирования прошивкой

Для плакирования может применяться металл в виде порошка или в компактном состоянии, возможно использование композиционного материала. После размещения в лунке плакирующего материала производится его деформирование пуансоном. По мере роста усилия происходит распрессовка плакирующей вставки в лунке. Свободная осадка вставки высотой h_b происходит до момента контакта ее боковой по-

верхности со стенкой полости (рис. 2). Эту вторую стадию называют распрессовкой плакирующей вставки. Вторая стадия распрессовки плакирующей вставки аналогична процессу свободной осадки цилиндра, который достаточно полно изучен.

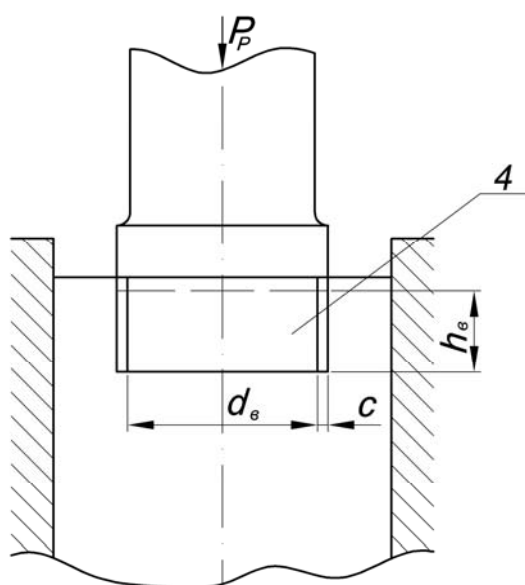


Рис. 2. Схема второй стадии плакирования прошивкой

После окончания распрессовки происходит деформация кольцевой зоны основной заготовки плакирующим материалом (рис. 3). Плакирующая вставка, находящаяся под торцом пуансона в состоянии трехосного сжатия, осаживается при наличии давления на ее боковой поверхности со стороны основного материала. Происходит так называемая стесненная или закрытая осадка. На стадии распрессовки и стесненной осадки вставки осуществляется развитие очага деформации, и после его формирования пуансон начинает внедряться в заготовку. В процессе прошивки пластичный плакирующий материал, расположенный в очаге деформации и находящийся под высоким гидростатическим давлением, оттесняет материал заготовки в радиальном направлении, при этом на боковой поверхности полости формируется плакирующий слой [6]. Сформировавшийся очаг пластической деформации не претерпевает существенных изменений, пока толщина дна заготовки не будет соизмерима с высотой пластической зоны, расположенной под торцом пуансона. Данная третья стадия характеризует установившийся процесс плакирования и называется стесненной осадкой плакирующей вставки.

По мере внедрения пуансона и сближения контактных поверхностей пуансона и дна матрицы на расстояние, при котором пластической деформацией будет охвачена вся часть заготовки, расположенная ниже торца пуансона, начинается последняя стадия процесса, характеризуемая резким изменением направления течения металла и ростом усилия прошивки. На этой четвертой стадии процесс прошивки заканчивается в момент, когда торец пуансона еще не достиг дна заготовки.

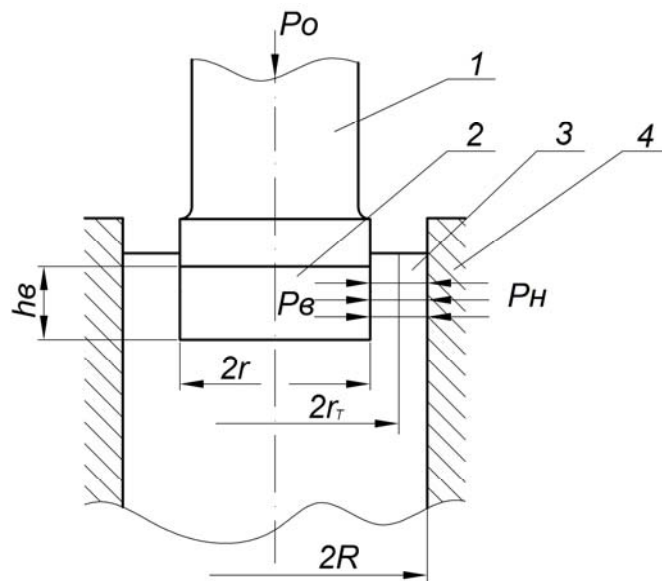


Рис. 3. Схема третьей стадии плакирования прошивкой

Постановка задачи

Многие особенности и закономерности плакирования прошивкой остаются не достаточно изученными. Так, отсутствуют зависимости для определения величины давления и усилия плакирования, которые используются при выборе технологического оборудования для осуществления исследуемого процесса. Основной стадией рассматриваемого процесса является третья стадия, формирующая получаемое изделие. Технологическое усилие используемого оборудования должно обеспечивать осуществление именно этой стадии, которая является наименее изученной. При определении значений технологических усилий необходимо иметь формулы для главных напряжений в очаге деформации. Для получения этих формул вначале необходимо провести анализ напряженного состояния очага деформации для третьей стадии плакирования прошивкой.

Целью представляемого исследования является анализ напряженного состояния и получение зависимостей для главных напряжений очага деформации процесса плакирования прошивкой на стадии стесненной осадки плакирующей вставки.

Напряженное состояние очага деформации при прошивке объемное и характеризуется тремя главными напряжениями сжатия: радиальным, тангенциальным и осевым. Три главных напряжения связаны между собой. Если известны минимум два из трех главных напряжений в очаге деформации, то третье главное напряжение определяется из условия пластичности. Поэтому необходимо получить зависимости для двух главных напряжений.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований

Для анализа напряженного состояния очага пластической деформации на основной третьей стадии необходимо на уровне поперечного сечения очага деформации (рис. 3) выделить элементарный объем в области заготовки 3, который представлен на рис. 4. Принимается допущение об исключении имеющегося влияния изменения структуры этого элемента на его напряженное состояние [7].

Для выделенного элементарного объема (рис. 4) составим уравнение условия равновесия:

$$(\sigma_p + d\sigma_p)(\rho + d\rho)d\varphi dz - \sigma_p \rho d\varphi dz - 2\sigma_\theta \sin(d\varphi/2) = 0, \quad (1)$$

где σ_ρ – радиальное напряжение; σ_θ – тангенциальное напряжение; ρ – текущий радиус, изменяемый от r до R ; $d\rho, d\varphi, dz$ – размеры элементарного объема.

Из (1) следует:

$$\frac{d}{d\rho}(\sigma_\rho \rho) - \sigma_\theta = 0. \quad (2)$$

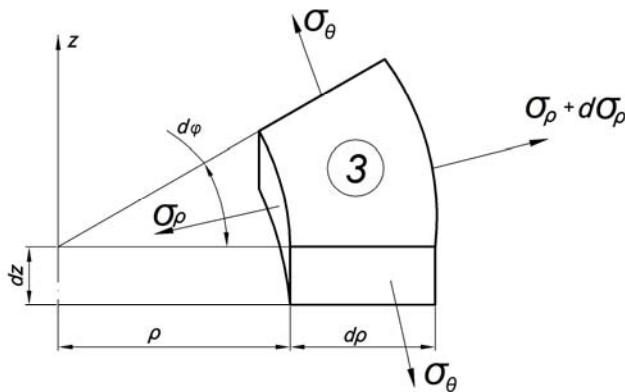


Рис. 4. Схема выделенного элемента

Для осесимметричного напряженно-деформированного состояния тангенциальные и радиальные деформации равны:

$$\varepsilon_\theta = U_\rho / \rho;$$

$$\varepsilon_\rho = dU_\rho / d\rho. \quad (3)$$

Откуда

$$\frac{d}{d\rho}(\varepsilon_\theta \rho) - \varepsilon_\rho = 0. \quad (4)$$

В соответствии с законом Гука:

$$\varepsilon_\rho = \frac{1}{E}(\sigma_\rho - \mu\sigma_\theta); \quad (5)$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{1}{E}(\sigma_\theta - \mu\sigma_\rho).$$

Подставляя (5) в (4), получим

$$\frac{d}{d\rho}(\sigma_\theta \rho) - \sigma_\rho = 0. \quad (6)$$

Складывая и вычитая уравнения (2) и (6), получим:

$$\frac{d}{d\rho}[(\sigma_\theta - \sigma_\rho)\rho] - (\sigma_\theta + \sigma_\rho) = 0; \quad (7)$$

$$\frac{d}{d\rho}[(\sigma_\theta + \sigma_\rho)\rho] + (\sigma_\theta - \sigma_\rho) = 0.$$

Решая уравнения (7), имеем:

$$\begin{aligned}\sigma_{\theta} + \sigma_{\rho} &= 2A; \\ \sigma_{\theta} - \sigma_{\rho} &= 2B/\rho^2,\end{aligned}\tag{8}$$

где A и B – произвольные постоянные.

Откуда

$$\begin{aligned}\sigma_{\rho} &= A - \frac{B}{\rho^2}; \\ \sigma_{\theta} &= A + \frac{B}{\rho^2}.\end{aligned}\tag{9}$$

Из (3), (7) и (9) имеем

$$U_{\rho} = \frac{1}{E} \left[A(1-\mu)\rho + B(1+\mu)\frac{1}{\rho} \right],\tag{10}$$

где μ – коэффициент Пуассона.

Для зоны пластической деформации условие пластичности имеет вид:

$$\sigma_{\theta} - \sigma_{\rho} = \beta\sigma_s = \sigma_s^*.\tag{11}$$

Из (1) следует уравнение

$$\sigma_{\rho} + \frac{d\sigma_{\rho}}{d\rho}\rho - \sigma_{\theta} = 0.\tag{12}$$

Уравнение (12) с учетом (11) будет иметь вид:

$$\frac{d\sigma_{\rho}}{d\rho} = \frac{\sigma_s^*}{\rho}.\tag{13}$$

Интегрируя (13), принимая за константу σ_s^* , получим

$$\sigma_{\rho} = \sigma_s^* \ln \rho + C.\tag{14}$$

При $\rho = r_T$ $\sigma_{\rho} = \sigma_{r_T}$ из выражения (14) получим

$$C = \sigma_{r_T} - \sigma_s^* \ln r_T,\tag{15}$$

где r_T – радиус границы, разделяющей упругую и пластическую зоны.

Подставив (15) в (14), получим

$$\sigma_{\rho} = \sigma_s^* \left(\ln \frac{\rho}{r_T} + \frac{\sigma_{r_T}}{\sigma_s^*} \right).\tag{16}$$

Принимая $\frac{\sigma_{r_T}}{\sigma_s^*} = C_1$, получим:

$$\sigma_\rho = \sigma_s^* \left(\ln \frac{\rho}{r_T} + C_1 \right);$$

$$\sigma_\theta = \sigma_\rho + \sigma_s^* = \sigma_s^* \left(\ln \frac{\rho}{r_T} + C_1 + 1 \right).$$
(17)

Для определения напряжений в упругой зоне используются формулы (9), в пластической зоне – формулы (17). При этом предполагается, что при переходе через границу между упругой и пластической зонами компоненты напряжений и перемещений изменяются непрерывно.

Постоянные величины A, B, C_1 определяются из следующих граничных условий:

$$\text{при } \rho = r, \sigma_\rho = -p_B; \quad (18)$$

$$\text{при } \rho = R, \sigma_\rho = -p_H; \quad (19)$$

$$\text{при } \rho = r_T, \sigma_\rho^p = \sigma_\rho^e; \quad (20)$$

$$\text{при } \rho = r_T, \sigma_\theta^p = \sigma_\theta^e, 4) \quad (21)$$

где верхними индексами p и e отмечены напряжения соответственно в пластической и упругой области.

Из (9) с учетом граничного условия (19) следует:

$$A - \frac{B}{R^2} = -p_H. \quad (22)$$

Из выражений (17) и (9) с учетом граничных условий (20) и (21) следует:

$$\sigma_\rho = \sigma_s^* C_1 = A - \frac{B}{r_T^2}; \quad (23)$$

$$\sigma_\theta = \sigma_s^* (C_1 + 1) = A + \frac{B}{r_T^2}. \quad (24)$$

Совместное решение (23) и (24) позволяет получить

$$B = \sigma_s^* \frac{r_T^2}{2}.$$

Подставив B в (22), можно получить

$$A = \sigma_s^* \frac{r_T^2}{2R^2} - p_H.$$

Подставляя A и B в (23), можно получить

$$C_1 = \frac{r_T^2 - R^2}{2R^2} - \frac{p_H}{\sigma_s^*}. \quad (25)$$

Подставив значение C_1 в (17), получим

$$\begin{aligned}\sigma_{\rho} &= \frac{\sigma_s^*}{2} \left(2 \ln \frac{\rho}{r_T} + \frac{r_T^2}{R^2} - 1 \right) - p_H; \\ \sigma_{\theta} &= \frac{\sigma_s^*}{2} \left(2 \ln \frac{\rho}{r_T} + \frac{r_T^2}{R^2} + 1 \right) - p_H.\end{aligned}\quad (26)$$

Если принять перемещение по наружной поверхности равным при $\rho = R, U_R = 0$, то в соответствии со значениями A и B из (10) следует:

$$U_R = \frac{1}{E} \left[\left(\frac{\sigma_s^*}{2} \frac{r_T^2}{R^2} - p_H \right) (1 - \mu) \rho + \sigma_s^* \frac{r_T^2}{2} (1 + \mu) \frac{1}{\rho} \right] = 0. \quad (27)$$

Откуда

$$p_H = \sigma_s^* \frac{r_T^2}{R^2} \frac{1}{1 - \mu}. \quad (28)$$

При пластической деформации на все сечение кольца $r_T = R$ и $\mu = 0,5$, тогда из (28):

$$p_H = 2\sigma_s^*. \quad (29)$$

Величина напряжений в предельном состоянии при $r_T = R$ и $p_H = 2\sigma_s^*$ из (26) равна:

$$\begin{aligned}\sigma_{\rho} &= \sigma_s^* \left(\ln \frac{\rho}{R} - 2 \right); \\ \sigma_{\theta} &= \sigma_s^* \left(\ln \frac{\rho}{R} - 1 \right).\end{aligned}\quad (30)$$

Уравнения (30) являются итоговыми зависимостями анализа напряженного состояния очага деформации. Они позволяют определять главные напряжения в очаге деформации.

Напряжения, действующие на плакирующую вставку со стороны основного материала, определяются из (30) при $\rho = r$:

$$\begin{aligned}\sigma_{\rho} &= \sigma_s^* \left(\ln \frac{r}{R} - 2 \right); \\ \sigma_{\theta} &= \sigma_s^* \left(\ln \frac{r}{R} - 1 \right).\end{aligned}\quad (31)$$

Адекватность полученных зависимостей (31) определялась экспериментально.

Экспериментальные исследования проводились на устройстве для плакирования прошивкой (рис. 5). В цилиндрических образцах алюминиевого сплава АДЮ с радиусом $R = 20$ мм и высотой 50 мм формировалось центральное отверстие с радиусом $r = 10$ мм с одновременным нанесением оловянного покрытия из порошкового олова ПО2, используемого как припойный слой. Практическое назначение этого процесса – получение алюминиевых радиаторов с внутренним припойным слоем.

Измерялось боковое давление прошивки p_H с помощью мездозы 4 (рис. 5), подсоединенной к силоизмерительной аппаратуре. Диаметр контактного стержня мездозы 1,13 мм, контактная площадь – 1 мм².

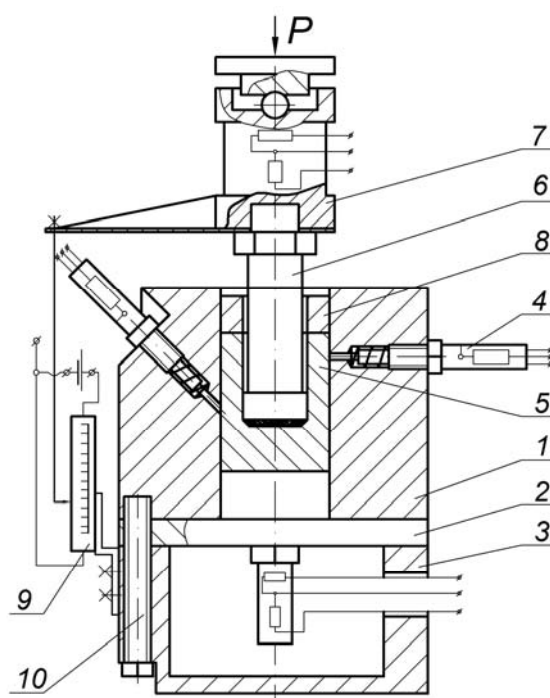


Рис. 5. Схема экспериментального устройства для плакирования прошивкой

Экспериментальная величина бокового давления p_H составила 138 МПа.

Теоретическое значение этой величины с учетом полученного закона упрочнения алюминиевого сплава АД0 определяется из (29):

$$p_H = 2 \cdot \beta \sigma_s.$$

Полученный методом осадки образцов закон упрочнения имеет вид:

$$\sigma_s = 46,13 + \varepsilon - 0,01 \cdot \varepsilon^2, \text{ МПа},$$

где ε – степень деформации образца, %.

Принимается $\beta = 1$, так как деформированное состояние очага деформации объемное и осесимметричное.

Для рассматриваемого эксперимента:

$$\varepsilon = \frac{r^2}{R^2} \cdot 100 = \frac{10^2}{20^2} \cdot 100 = 25 \text{ \%}.$$

Тогда

$$p_H = 2 \cdot 1 \cdot (46,13 + 25 - 0,01 \cdot 25^2) = 129,76, \text{ МПа}.$$

В результате измерения бокового давления прошивки и последующего расчета этой величины получена относительная погрешность 6 %. Это доказывает адекватность формулы (31) и как следствие формулы (30).

Заключение

В результате выполненного анализа напряженного состояния очага деформации при плакировании прошивкой получены уравнения (27), позволяющие вычислять радиальные и тангенциальные уравнения непосредственно в очаге деформации при прошивке.

Литература

1. Буренков, В. Ф. Исследование процесса нанесения металлического порошкового покрытия при закрытой прошивке / В. Ф. Буренков, Е. Г. Сычев, В. К. Шелег // Кузнечно-штамповочное пр-во. – 1986. – № 9. – С. 4–6.
2. Буренков, В. Ф. Экспериментальное изучение характера течения металла при прошивке с плакированием / В. Ф. Буренков, Е. Г. Сычев // Кузнечно-штамповочное пр-во. – 1993. – № 11. – С. 3–4.
3. Способ плакирования при прошивке: а. с. 1503921 (СССР), МКИ В 21 С 23/22 / Е. Г. Сычев, В. Ф. Буренков. – № 4158846 ; приор. от 03.11.1986 ; рег. 01.05.1989.
4. Устройство для нанесения порошкового покрытия на внутреннюю поверхность трубы : а. с. 1357135 (СССР), МКИ В 22 А 7/04 / А. В. Степаненко, Е. Г. Сычев, В. Ф. Буренков. – № 4042421; приор. от 24.03.1987; рег. 8.08.1987.
5. Способ формирования покрытия при прошивке : а. с. 1514445 (СССР), МКИ В 21 С 23/22. / Е. Г. Сычев, В. Ф. Буренков. – № 4209840 ; приор. от 03.02.1987 ; рег. 15.06.1989.
6. Бобарикин, Ю. Л. Исследование соединения металлов при плакировании закрытой прошивкой / Ю. Л. Бобарикин, В. Ф. Буренков, Н. И. Базилева // Современные проблемы машиноведения : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Гомель, 1998 г. / Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 1998. – С. 172–174.
7. Ковтун, В. А. Влияние структуры металлополимерных порошковых систем на напряженное состояние композита / В. А. Ковтун, Т. В. Семенова // Вес. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2007. – № 2. – С. 12–18.

Получено 27.03.2009 г.