

УДК 621.762

АНАЛИЗ УСЛОВИЯ СОЕДИНЕНИЯ ПОКРЫТИЯ С ОСНОВОЙ ПРИ ПЛАКИРОВАНИИ ВОЛОЧЕНИЕМ

Н. В. ИНОЗЕМЦЕВА, Ю. Л. БОБАРИКИН*, О. М. ВАЛИЦКАЯ

Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого, пр-т Октября 48, 246746 г. Гомель, Беларусь.

Исследовано условие соединения металлической основы с порошковым металлическим покрытием плакированием в процессе волочения. В результате определены пути выбора технологических режимов плакирования, обеспечивающих выполнение исследованного условия.

Введение и постановка задачи

Способы нанесения металлических покрытий на поверхность металлической проволоки плакированием, т. е. за счет совместной пластической деформации наносимого и покрываемого металлов являются достаточно высокопроизводительными и относительно неэнергоёмкими по сравнению с большим многообразием других способов нанесения покрытий [1].

При нанесении порошкового покрытия на проволоку волочением в очаге деформации в волоке или матрице происходит совместная пластическая деформация подаваемого порошка и деформируемой основы. В результате на выходе из инструмента на металлической основе формируется покрытие. При плакировании материал основы должен быть менее пластичным по сравнению с материалом покрытия чтобы избежать растрескивания покрытия. Проблема надежности соединения между слоем покрытия и основой достаточно актуальна, так как именно качество этого соединения, заключающееся в отсутствии отслоений покрытия от основы, во многом обеспечивает эксплуатационные характеристики получаемого материала. Для получения соединения между покрытием и основой необходимо добиться активного состояния контактирующих поверхностей покрытия и основы. Активное состояние поверхностей при плакировании волочением достигается пластической деформацией. В связи с тем, что более пластичное покрытие и менее пластичная основа деформируются совместно, то будет достаточно добиться активного состояния менее пластичной основы, так как при этом условии более пластичное покрытие будет гарантированно активировано.

Для исключения возможности разрыва образовавшихся при соединении связей между покрытием и основой вследствие остаточных деформаций необходимо добиться релаксации внутренних напряжений в пакете покрытие-основа. При полойном рассмотрении данного пакета можно предположить, что добиться релаксации внутренних напряжений достаточно в относительно более мягком слое, т. е. в покрытии. В этом случае релаксация внутренних напряжений в основе не обязательна, так как остаточные деформации, действующие в основе, не разорвут соединение с мягким покрытием, где произошла релаксация внутренних напряжений. Исходя из 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 биметаллического материала через зону деформации; t_a – время активации поверхности основы в зоне соединения; t_p – время релаксации остаточных напряжений в покрытии.

Время совместной пластической деформации определяется по зависимости:

$$t_d = \frac{l_d}{v_n}, \quad (2)$$

где l_d – длина очага деформации при волочении (рис. 1), которая определяется по зависимости

$$l_d = \frac{1}{\operatorname{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right)}(r_0 - r_1),$$

где r_0 – радиус проволоки до волочения, м; r_1 – радиус проволоки после волочения, м; v_n – скорость процесса деформирования волоче-

* Автор, с которым следует вести переписку.

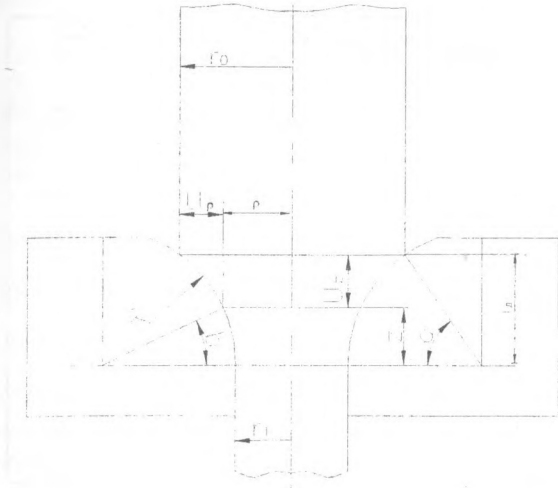


Рис. 1. Схема процесса волочения к расчету величины интенсивности поверхностной сдвиговой деформации

нием, м/с; α – угол радиусной зоны инструмента. При этом, в виду наличия тонкого порошкового покрытия между основой и инструментом, можно условно рассматривать непосредственный контакт инструмента с основой.

Для определения времени активации поверхности основы используем зависимость [2]

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

где L – путь движения дислокации до барьера в материале основы, м; b – модуль вектора Бюргерса для материала основы, м; $\dot{\epsilon}$ – скорость деформации материала основы в зоне соединения, 1/с; S – изменение площади активного центра в месте выхода дислокаций к поверхности основы в зоне соединения, м².

Время релаксации внутренних напряжений в покрытии определяется исходя из зависимости, приведенной в [2];

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

где t_0 – период собственных колебаний атомов около равновесного положения, $t_0 = 10^{-13}$ с; R^* – универсальная газовая постоянная, $R^* = 8,31$ Дж/(К·моль); T – температура в очаге деформации при волочении, К; U – энергия активации процесса, контролирующего релаксацию внутренних напряжений в покрытии, Дж/моль.

Изменение площади активного центра S определяется по формуле из [2]:

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

где r – радиус активного центра, м.

Величина r определяется:

$$r^2 = \frac{1}{4\rho_d}, \quad (6)$$

где ρ_d – плотность дислокаций в зоне контакта, 1/м².

Скорость деформации материала основы в зоне соединения можно определить по зависимости:

$$\dot{\epsilon} = \frac{\epsilon_i}{t_d}, \quad (7)$$

где ϵ_i – интенсивность поверхностной деформации основы.

Величина ϵ_i определяется по зависимости:

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

где γ_i – интенсивность поверхностной сдвиговой деформации основы.

Величина L определяется по зависимости из [2]:

$$L = \rho_d^{-\frac{1}{2}}, \quad (9)$$

Энергия активации процесса U , контролирующего релаксацию внутренних напряжений в покрытии, определяется для процессов протекающих при $T \leq 0,5 T_{пл}$ ($T_{пл}$ – температура плавления материала покрытия, К) энергией термически активируемых процессов поперечного скольжения, пересечения дислокаций, трения в решетке, обусловленное силами Пайерлса. Для процессов при $T > 0,5 T_{пл}$ величина U определяется как энергия активации самодиффузии [3].

Для использования условия (1) численно неопределенными остаются параметры ρ_d , γ_i и T . Величину ρ_d допустимо принять равной максимально достижимой величине при пластической деформации металла [5], т. е. $\rho_d = 10^{16}$ 1/м². Исходя из вышесказанного с целью определения неизвестных параметров, входящих в условие (1) необходимо:

1. Определить сдвиговые деформации на поверхности основы в зоне контакта соединяемых поверхностей.

2. Определить величину температуры в очаге деформации, влияющей на релаксацию остаточных напряжений.

Определение параметров, входящих в условие получения соединения

Для количественной оценки величины сдвиговой деформации на поверхности основы необходимо определить величину интенсивности сдвиговой деформации γ_i на контакте с порошком в зоне деформации. Выражение, определяющее интенсивность сдвиговой деформации на контактной поверхности, позволит судить о величине сдвига и о методах его увеличения. Для определе-

ния интенсивности поверхностной сдвиговой деформации можно воспользоваться формулой из [4], определяющей γ_i в цилиндрической системе координат:

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

где E_p, E_θ, E_z – относительные удлинения; $\gamma_{p\theta}, \gamma_{\theta z}, \gamma_{zp}$ – относительные сдвиги.

Относительные удлинения и сдвиги определяются по формулам:

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

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

$$\gamma_{pz} = \frac{\partial U_p}{\partial z} - \frac{\partial U_z}{\partial \rho}$$

где U_p, U_θ, U_z – проекции перемещения точек, находящихся на контактной поверхности с инструментом в очаге деформации.

Определим перемещения U_p и U_z точки, лежащей на поверхности заготовки и движущейся от начала очага деформации по контактной дуге. Для этого рассмотрим очаг деформации при волочении (рис. 1).

$$U_p = R \cos \beta - R \cos \alpha;$$

$$U_p = r_0 - \rho; \quad E_p + E_\theta = E_z, \quad (12)$$

где R – радиус закругления инструмента,

$$\beta = \arcsin \frac{z}{R}.$$

При этом перемещение $U_\theta = 0$.

Определим относительные удлинения и сдвиги, проведем преобразования:

$$E_\theta = \frac{U_p}{\rho} = \frac{\cos \beta - \cos \alpha}{\cos \alpha - \cos \beta + \frac{r_0}{R}} = A$$

$$\gamma_{p\theta} = 0; \quad \gamma_{\theta z} = 0;$$

$$E_p = E_\theta = A = -\frac{E_z}{2}; \quad E_z = -2A; \quad (13)$$

$$\gamma_{pz} = \frac{\partial U_p}{\partial z} = \frac{-z}{R \sqrt{1 - \frac{z^2}{R^2}}}.$$

Подставляя (13) в (10) и после преобразования получим выражение для интенсивности деформации сдвига:

$$\gamma_i = \frac{2}{3} \sqrt{18 \left(\frac{\cos \beta - \cos \alpha}{\cos \alpha - \cos \beta + \frac{r_0}{R}} \right)^2 + \frac{3}{2} \frac{z^2}{(R^2 - z^2)}}. \quad (14)$$

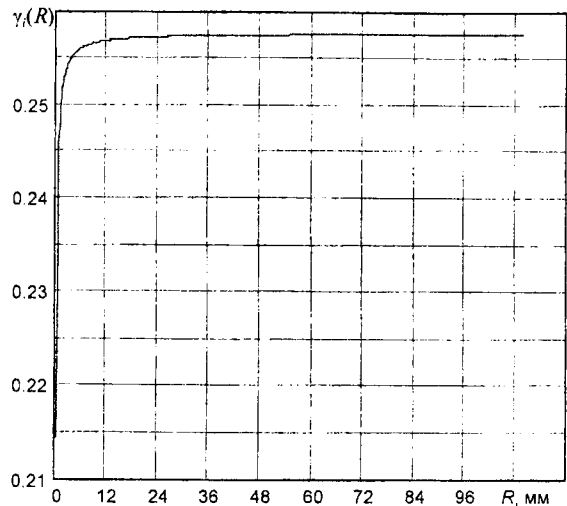


Рис. 2. Зависимость интенсивности поверхностной сдвиговой деформации γ_i от радиуса инструмента в рабочей зоне R , для $r_0 = 2$ мм

На рис. 2 изображена теоретическая зависимость интенсивности поверхностной сдвиговой деформации основы от радиуса инструмента.

Из анализа формулы (14) и рис. 2 видно, что, чем больше значение угла α и соответственно меньше радиус закругления инструмента R , то тем меньше значение γ_i . Вследствие этого для увеличения сдвига и соответственно повышения прочности сцепления покрытия необходимо применять при волочении инструмент с максимально возможным закруглением рабочей поверхности.

Изменение температуры T в очаге деформации, входящей в зависимость (4), 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:

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

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.

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

$$Q_1 = \frac{c \rho_0 V}{t_0} (T_M - T_0), \quad (16)$$

где c – удельная теплоемкость материала основы Дж/(кг К); ρ_0 – плотность материала основы, кг/м³; T_0 – начальная температура, К; T – температура в очаге деформации, К; T_M – температура ме-

талла на выходе из очага деформации, К;
 $V = \pi R^2 \int_0^{l_d} (\cos\beta - \cos\alpha)^2 dz$ – объем очага деформации при волочении, м³ (см. рис. 1), где z – координата положения точки на контактной поверхности, м.

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

$$Q_2 = c_1 \rho_1 S_k \vartheta_n (T - T_0) \quad (17)$$

где $S_k = 0$ – площадь пятна контакта очага деформации с воздухом, м² (см. рис. 1); 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; c_1, ρ_1 – соответственно удельная теплоемкость и плотность воздуха.

Тепловая мощность, отдаваемая заготовкой инструментом, определяется по формуле:

$$Q_3 = c_2 \rho_2 S_k^I (T - T_0), \quad (18)$$

где $S_k^I = \pi \alpha R (r_0 + r_1)$ – площадь пятна контакта очага деформации с инструментом, м² (см. рис. 1); c_2, ρ_2 .

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

$$Q_4 = c \rho_0 S_k^{II} (T - T_0), \quad (19)$$

где $S_k^{II} = \pi (r_0^2 + r_1^2)$ – площадь пятна контакта очага деформации с недеформируемой частью заготовки, м² (см. рис. 1).

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

$$Q_i = Q_T + Q_n, \quad (20)$$

где Q_T – тепловая мощность сил контактного трения.

$$Q_T = A_T \dot{\epsilon}, \quad (21)$$

где A_T – работа сил контактного трения, Дж; Q_n – тепловая мощность пластической деформации

$$Q_n = A_n \dot{\epsilon}, \quad (22)$$

где A_n – работа пластической деформации, Дж.

Сумма работ пластической деформации A_n и сил контактного трения A_T определит работу деформирующих сил при пластической деформации A_p , т. е.

$$A_p = A_n + A_T, \quad (23)$$

Величину A_n можно определить по формуле:

$$A_n = \iiint_V k \gamma_i^* dV, \quad (24)$$

где k – постоянная пластичности; V – деформируемый объем; γ_i^* – интенсивность деформаций сдвига в деформируемом объеме.

Для плакирования осадкой, волочением, обратным и прямым выдавливанием (т. е. для осесимметричных задач) величина A_n определится по общей зависимости

$$A_n = \iiint_V k \gamma_i \rho d\rho d\theta dz. \quad (25)$$

Учитывая величины интенсивности деформаций сдвига в деформируемом объеме и объема очага деформации для процесса прямого выдавливания, величина A_n определится по зависимости:

$$A_n = k \ln \left(1 - \frac{r_1^2}{r_0^2} \right) \sqrt{3} \pi R^2 \int_0^{l_0} (\cos\beta - \cos\alpha)^2 dz. \quad (26)$$

Величину A_T можно определить по формуле;

$$A_T = \iint_F (\tau_k^x U_x + \tau_k^y U_y + \tau_k^z U_z) dF, \quad (27)$$

где F – площадь контакта, где действуют силы трения; $\tau_k^x, \tau_k^y, \tau_k^z$ – проекции элементарных сил трения на оси прямоугольной системы координат.

Для определения величины контактного касательного напряжения τ_k используется положение Э. Зибеля, согласно которому:

$$\tau_k = 2fk, \quad (28)$$

где f – коэффициент контактного трения.

Подставляя величины перемещений точек по контактной поверхности и проекции элементарных сил трения в (27), получим выражение для работы сил контактного трения в процессе волочения:

$$A_T = 2\pi f k R \int_0^{l_0} \left[\cos\beta - \cos\alpha \sqrt{1 + \frac{z^2}{(R^2 - z^2/R^2)}} (z \cos\alpha - r_0 \cos\beta) \right] dz. \quad (29)$$

Подставляя выражения (16)–(29) в выражение (15) и после элементарных преобразований получим выражение для температуры в очаге деформации при волочении:

$$T = T_0 + \frac{A_p \dot{\epsilon} l_0}{2c \rho_0 \pi R^2 \int_0^{l_0} (\cos\beta - \cos\alpha)^2 dz + c_1 \rho_1 l_0 \left(\frac{\pi}{2} \alpha R (r_1 + r_0) + \pi (r_1^2 + r_0^2) \right)}. \quad (30)$$

Полученные зависимости позволяют определять величины t_d, t_a, t_p входящие в условие (1), и возможность достижения соединения между слоями при плакировании.

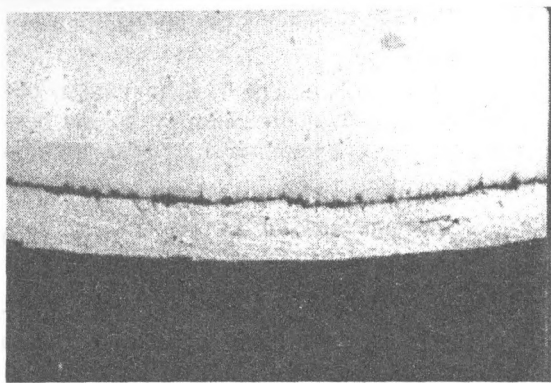


Рис. 3. Зона содинения пары сталь–цинк

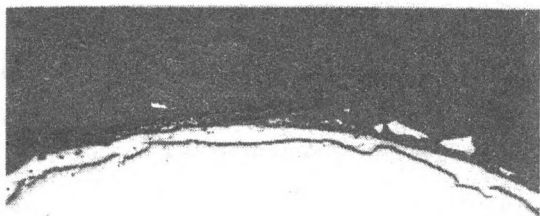


Рис. 4. Зона содинения пары медь–олово

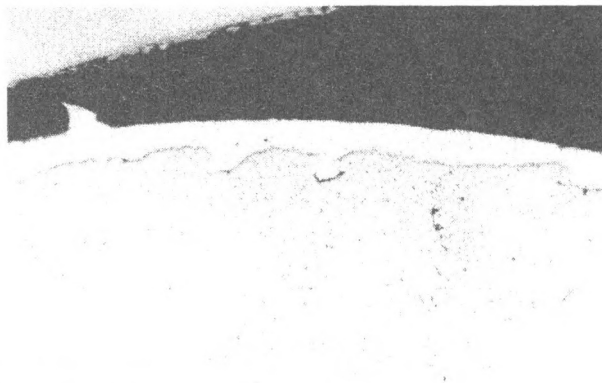


Рис. 5. Зона содинения пары медь–олово



Рис. 6. Зона содинения пары сталь–цинк

Экспериментальное исследование условия содинения при волочении

Экспериментальное исследование проводилось для процесса волочения без нагрева. Качество получаемых плакированных содинений исследовалось методом внешнего осмотра и на микроскопе МНР-2. В качестве основы использовались медная и стальная проволоки. В качестве порошков, применяемых для формирования плакирующего покрытия, использовались порошки олова ПО2 и цинка ПЦ2.

Для подтверждения теоретических формул был проведен расчет в MATHCAD. Для пары металлов сталь–цинк $d_1 = 3,5 \cdot 10^{-3}$ м, $d_0 = 4 \cdot 10^{-3}$ м расчет показал, что условие (1) не выполнимо и имеет вид: $0,445 > 0,014 \cdot 10^{-4} > 2,092 \cdot 10^3$ с. Данный расчет подтверждается экспериментально (рис. 3). На изображении зоны содинения имеет место отслоение покрытия от основы.

Для пары металлов медь–олово $d_1 = 2,95 \cdot 10^{-3}$ м, $d_0 = 3,15 \cdot 10^{-3}$ м условие (1) также не выполняется: $0,285 > 0,017 < 0,147$ с. Это также подтверждается экспериментально (рис. 4).

Для выполнения условия содинения необходимо добиться достаточной шероховатости поверхности (рис. 5), либо повысить температуру в очаге деформации за счет изменения начальной температуры (рис. 6).

При плакировании волочением с подогревом зоны содинения до температуры близкой к температуре плавления цинка для пары сталь–цинк условие (1) примет вид: $0,445 > 3,583 \cdot 10^{-5} > 3,151 \cdot 10^{-5}$ с (рис. 6).

Заключение

В результате проведенных исследований найдено условие (1) содинения волочением плакируемой основы с плакирующим покрытием, учитывающее влияние термомеханических воздействий на обрабатываемые материалы. Найденное условие позволяет повысить эффективность процесса за счет обоснованного выбора режимов плакирования. Варьированием технологическими режимами плакирования: интенсивностью деформации, скоростью деформации, геометрией очага деформации и начальной температурой соединяемых материалов, можно достичь оптимальную эффективность содинения.

Литература

1. Валицкая О. М., Бобарикин Ю. Л. Исследование способов плакирования проволоки металлическими порошками в процессе волочения // *Материалы, технологии, инструменты*, 4 (1999), № 4, 78–81
2. Каракозов Э. С., Орлова Л. М., Пешков В. В. Диффузионная сварка титана. М.: *Металлургия* (1977)
3. Гарафало Ф. Законы ползучести и длительной прочности металлов и сплавов. Перев. с англ. М.: *Металлургия*

- (1968)
4. Громов А. В. Теория обработки металлов давлением. М.: Металлургия (1978)
5. Колмогоров В. Л. Механика обработки металлов давлением. М.: Металлургия (1986)
-

Inosemtseva N. V., Bobarikin J. L., Valitskaya O. M.

The analysis of the condition for joining the base to coating by drawing with cladding.

The condition for joining the metal base to the powder metal coating by means of drawing is investigated here. As a result the ways that specify cladding operating conditions (regimes), providing the performance of the investigated condition are defined in this paper.

Поступила в редакцию 11.09.2002.

© Н. В. Иноземцева, Ю. Л. Бобарикин, О. М. Валицкая, 2004.