

## ПОЛУЧЕНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ, ПЛАКИРОВАННЫХ ПОРОШКОВЫМИ ПОКРЫТИЯМИ

Ю. Л. БОБАРИКИН, Н. В. СЕЛИВОНЧИК, А. Н. ШВЕЦОВ, С. В. ШИШКОВ

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

Способы нанесения металлических покрытий плакированием, или за счет совместной пластической деформации наносимого и покрываемого металлов являются достаточно высокопроизводительными и относительно неэнергоёмкими по сравнению с большим многообразием других способов нанесения покрытий.

Особый интерес среди них представляют способы, предполагающие нанесения покрытий из металлических или композиционных порошков на металлической основе. Разнообразие металлических порошков и неметаллических дополнительных включений позволяет варьировать свойствами покрытий в широких пределах за счет изменения состава порошковой шихты. Совместную деформацию порошков и металлической основы рационально проводить при помощи традиционных, но модифицированных операций обработки металлов давлением. В зоне деформации в операциях обработки металлов давлением можно достичь условий, позволяющих сформировать покрытие из порошка и соединить его с поверхностью деформируемой основы. Для этого необходимо одновременно вводить в зону деформации порошок и металлическую основу, а на выходе из инструмента получить изделие с нанесенным порошковым покрытием. При получении тонких порошковых покрытий на металлической основе посредством их совместной пластической деформации механическая схема должна обеспечивать определенные условия.

Механическая схема совместной деформации соединяемых материалов должна обеспечивать высокое нормальное давление между наносимым порошковым покрытием и основой для плотного контакта между ними, а также максимальные сдвиговые деформации для получения хорошей адгезии между ними. При этом для получения качественных сплошных покрытий схема напряженного состояния деформируемого порошкового слоя и основы должна иметь вид всестороннего сжатия. Для основы допустима схема напряженного состояния, имеющая одно напряжение растяжения и два сжатия, при этом в слое порошка обязательно должна присутствовать схема всестороннего сжатия.

При нанесении порошкового покрытия прокаткой (рис. 1, а) в очаге деформации между валками одновременно деформируется подаваемый порошок и металлическая основа в виде полосы или ленты, в результате на выходе из валков на металлической основе формируется покрытие. При нанесении порошкового покрытия волочением и прямым выдавливанием (рис. 1, б) в очаге деформации в волоке или матрице происходит совместная деформация подаваемого порошка и деформируемой основы в виде проволоки или стержня, в результате на выходе из инструмента на поверхности металлической основы формируется покрытие. При нанесении порошкового покрытия обратным выдавливанием (рис. 1, в) происходит совместная деформация порошка, находящегося в подпрессованном состоянии под пуансоном и металлической основой. При этом одновременно выдавливается порошок и основа. В результате в основе формируется глухое отверстие с порошковым покрытием. При нанесении порошкового покрытия осадкой (рис. 1, г) в очаге деформации под пуансоном одновременно деформируются порошок, предварительно помещенный на поверхность основы, и сама основа.

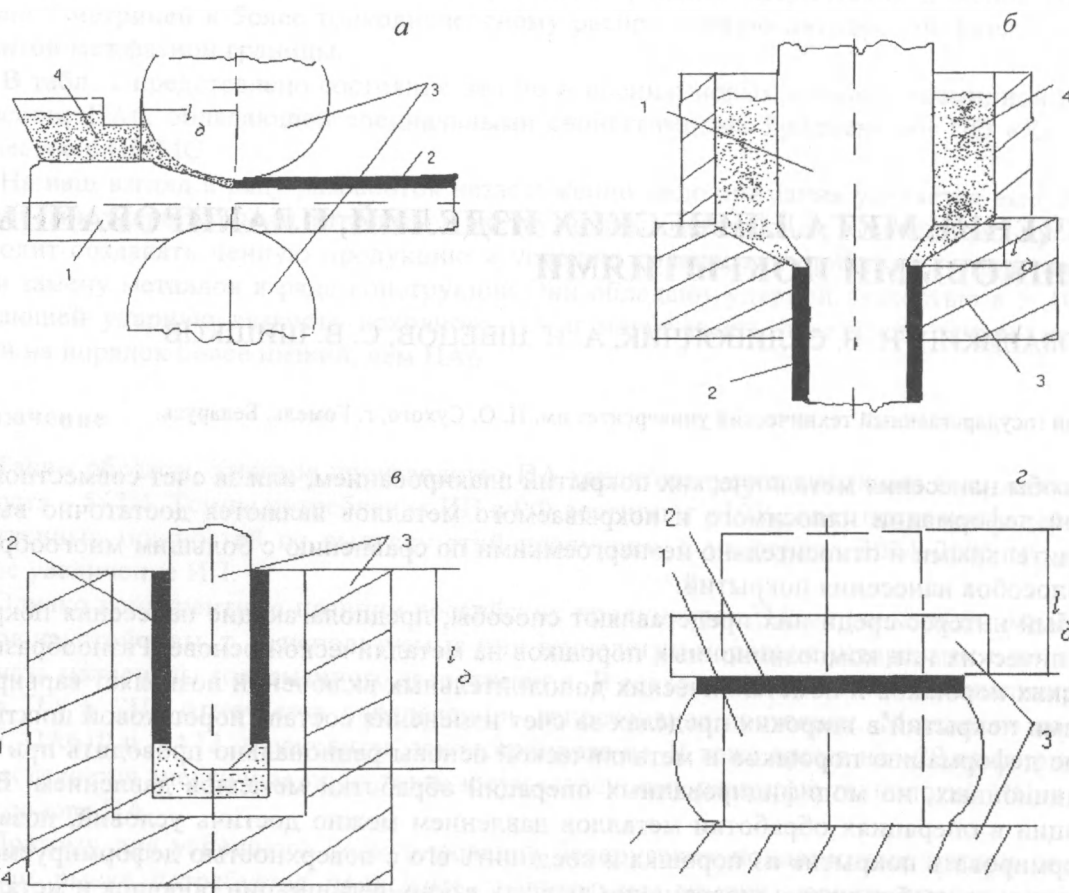


Рис. 1. Схемы получения металлических изделий с одновременным плакированием порошковыми покрытиями: 1 – металлическая основа; 2 – покрытие; 3 – инструмент; 4 – порошок

Практическое значение данных методов получения покрытий заключается в возможности высокоэффективного получения металлических изделий с композиционными разнофункциональными покрытиями.

Плакирование прокаткой позволяет получать длинномерные изделия типа листов, полос, лент с покрытиями. Плакирование волочением и прямым выдавливанием предназначено для получения длинномерных изделий типа проволоки и стержней с покрытием. Плакирование обратным выдавливанием позволяет получать изделия с глухими отверстиями, на поверхность которых наносится покрытие. Плакирование осадкой позволяет получать мерные изделия с покрытием.

Полученные плакированием изделия могут являться конечным продуктом, либо служить полуфабрикатом, предназначенным для дальнейшего изготовления продукции. Например, из плакированных полос, лент можно отштамповать требуемые изделия.

Порошковые покрытия могут быть антифрикционными, антикоррозионными, фрикционными, электротехническими, припойными, декоративными и др.

Во всех описанных схемах деформации порошок деформируется под влиянием схемы напряженного состояния всестороннего сжатия.

В процессах прокатки, прямого и обратного выдавливания, основа находится также под напряженным состоянием всестороннего сжатия, это позволяет получать более толстые и плотные покрытия.

В процессе волочения основа находится под схемой напряженного состояния, включающей два напряжения сжатия и одного растяжения. Это позволяет получать покрытия небольшой толщины с ограничением плотности.

Для всех указанных процессов обязательным является превышение твердости материала

основы над твердостью материала порошка. В противном случае происходит растрескивание наносимого порошкового покрытия.

Основной проблемой таких методов нанесения покрытий является качество соединения порошкового покрытия с металлической основой. В связи с этим исследование, определение и оптимизация условий, позволяющих получить покрытие с высокой адгезией к металлической основе, является актуальным.

Для получения достаточной адгезии в зоне соединения необходимо выполнение условия [1]:

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

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

Время совместной пластической деформации определяется по зависимости:

$$t_{\partial} = \frac{l_{\partial}}{v_n}, \quad (2)$$

где  $l_{\partial}$  – длина очага деформации, м;  $v_n$  – скорость процесса деформирования металла, м/с;

В случае, когда активным центром при схватывании является дислокация с полем напряжения для определения времени активации используется следующая зависимость из работы [1]

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

где  $L$  – путь движения дислокации до барьера м;  $b$  – модуль вектора Бюргера для материала менее пластичной основы, м;  $\dot{\epsilon}$  – скорость деформации металла в зоне соединения, 1/с;  $S$  – изменение площади активного центра в месте выхода дислокаций к зоне соединения, м<sup>2</sup>.

Время релаксации, в течение которого напряжения уменьшаются в 1/е раз от исходной величины определяется зависимостью [1]:

$$t_p = t_0 \exp\left(\frac{U}{kT}\right) \quad (4)$$

где  $t_0$  – период собственных колебаний атомов около равноосного положения,  $t_0 = 10^{-13}$  с;  $k$  – постоянная Больцмана,  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/к;  $T$  – температура в очаге деформации, К;  $U$  – энергия активации процесса, контролирующего релаксацию внутренних напряжений, которая определяется согласно работе [2] как энергия активации самодиффузии по границам зерен при для процессов, протекающих при  $T > 0,5T_{ni}$  и как энергия термически активируемых процессов (поперечное скольжение, пересечение дислокаций, трение в решетке, обусловленное, силами Пайерлса) для процессов, протекающих при  $T \leq 0,5T_{ni}$ .

Величины параметров, входящих в зависимости (3) и (4) определяются по нижеприведенным зависимостям.

Изменение площади активного центра  $S$  определяется по формуле из [1]:

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

где  $r$  – радиус активного центра, м;

Величина  $r$  определяется из зависимости:

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

где  $\rho_{\partial}$  – плотность дислокаций в зоне контакта, 1/м<sup>2</sup>.

Величина  $L$  определяется по зависимости из работы [1]:

$$L = \rho_0 \frac{1}{2} \quad (7)$$

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

$$\dot{\epsilon} = \frac{\gamma_i}{\sqrt{3} t_d} \quad (8)$$

где  $\gamma_i$  – интенсивность поверхностной сдвиговой деформации основы, определяемая для процессов плакирования исходя из геометрических перемещений контактных точек на поверхности основы.

Величина плотности дислокаций на поверхности металлической основы в зоне соединения с порошковым слоем зависит как от степени деформации, так и от ее скорости. Для определения ее величины можно использовать зависимость из [2]:

$$\rho_g = \frac{\dot{\gamma}}{b \vartheta_g}, \text{ м}^{-2}, \quad (9)$$

где  $\dot{\gamma}$  – скорость деформации сдвига на поверхности контакта металлической основы с порошком,  $c^{-1}$ ;  $b$  – вектор Бюргерса, м;  $\vartheta_g$  – средняя скорость пробега дислокаций, м/с.

Величину  $\dot{\gamma}$  можно выразить в зависимости от параметров  $t_d, \gamma_i$  по формуле:

$$\dot{\gamma} = \frac{\gamma_i}{t_d} \quad (10)$$

Скорость пробега дислокаций определяется по формуле [3, 4]:

$$\vartheta_g = \vartheta_{zs} \exp\left(-\frac{A}{kT}\right), \quad (11)$$

где  $\vartheta_{zs} = 5 \cdot 10^3$  – скорость звука в материале, где движутся дислокации, м/с;  $A$  – свободная энергия образования перегибов дислокаций, Дж. [5]

Энергия  $A$  определяется по формуле:

$$A = \frac{\mu b^2 a}{4\pi(1-\nu)} \left( \ln\left(\frac{a}{e\rho}\right) - (1-\nu) \right), \quad (12)$$

где  $\mu$  – модуль сдвига, Н/м<sup>2</sup>;  $\nu$  – коэффициент Пуассона;  $\alpha$  – коэффициент, определяющий период изменения энергии  $\rho = b/2\alpha$ ;  $e$  – основание натурального логарифма;  $\rho$  – коэффициент, равный  $\rho = b/2\alpha$ ;  $\alpha$  – параметр ядра, для металлов  $\alpha = 1.2$ ; для неметаллов  $\alpha = 4$ . Данная энергия является постоянной величиной для определенного материала.

Исходя из вышеизложенного, представляется важным определить температуру  $T$ , возникающую в очаге деформации при плакировании. Эта температура оказывает влияние на величину  $\rho_g$  и время  $t_d$ .

Изменение температуры в очаге деформации в процессе формоизменения зависит от затрачиваемой на деформацию работы и интенсивности теплоотвода от заготовки в окружающее пространство. Ее величина определяется как сумма температуры начального нагрева материала  $T_0$  и температуры, выделяемой в процессе пластической деформации металла по зависимости:

$$T = T_0 + \frac{(A_T + A_{\Pi}) \gamma_i}{2c\rho V + c_1\rho_1 t_d \vartheta_n S_k + c_2\rho_2 t_d S_k^1 + c\rho t_d S_k^2} \frac{1}{\sqrt{3}}, \quad (13)$$

где  $T_0$  – начальная температура, К;  $A_T$  – работа сил контактного трения, Дж;  $A_{\Pi}$  – работа пла-

стической деформации, Дж;  $c$  – удельная теплоемкость материала основы Дж/(кг К);  $\rho$  – плотность материала основы, кг/м<sup>3</sup>;  $c_1, \rho_1$  – соответственно удельная теплоемкость и плотность воздуха;  $S_k$  – площадь пятна контакта очага деформации с воздухом, м<sup>2</sup>;  $S_k^1$  – площадь пятна контакта очага деформации с инструментом, м<sup>2</sup>;  $c_2, \rho_2$  – соответственно удельная теплоемкость и плотность материала инструмента;  $S_k^{11}$  – площадь пятна контакта очага деформации с недеформируемой частью заготовки, м<sup>2</sup>;  $V$  – объем очага деформации, м<sup>3</sup>.

Подставляя в (3) зависимости (5)–(11), можно получить окончательное выражение для  $t_a$ :

$$t_a = \frac{4\sqrt{3}}{\pi} \sqrt{\frac{bt_0}{\gamma_1 g_{3g}} \exp\left(\frac{A}{kT}\right)}, \quad (14)$$

Полученное аналитическое условие (1) с необходимыми зависимостями, определяющими его составляющие величины, позволяет варьированием технологических параметров  $V, T, t_0, g, \gamma_1$  достигнуть получения качественного соединения материалов основы и покрытия при их совместной пластической деформации. Полученное условие подтверждено экспериментальными исследованиями.

Спресованное порошковое покрытие должно быть подвергнуто воздействию температуры около 0,85 температуры плавления основного компонента порошковой шихты в безокислительной среде. Это необходимо для окончательного спекания порошка. Данная температура может достигать либо при совместной деформации порошка и основы, либо после. Тот или иной подход зависит от условий проведения совместной деформации, от возможности обеспечения безокислительной среды.

Таким образом, разработаны основные принципы получения операциями обработки металлов давлением металлических изделий, плакированных порошковыми покрытиями.

#### Литература

1. Каракозов Э. С., Орлова Л. М., Пешков В. В. Диффузионная сварка титана. М.: Металлургия (1977)
2. Новиков И. И. Дефекты кристаллической решетки металлов. М.: Металлургия (1968)
3. Смирнов В. С. Теория обработки металлов давлением. М.: Металлургия (1973)
4. Фридель Ж. Дислокации / Пер. с франц. М.: Мир (1967)
5. Хирт Дж., Лоте И. Теория дислокаций / Пер. с англ. под ред. Э. М. Надгорного и Ю. А. Осипьяна. М.: Атомиздат (1972)

## РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ НОВЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С ПРОГНОЗИРУЕМЫМИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМИ СВОЙСТВАМИ НА ОСНОВЕ ТЕРМОПЛАСТОВ ВТОРИЧНОГО ПРИМЕНЕНИЯ И НИЗКОМОЛЕКУЛЯРНЫХ ЖИДКОСТЕЙ

Г. Я. ВЕРБИЩУК

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель, Беларусь.

Целью работы является разработка и исследование новых композиционных материалов: герметиков, мастики, замазки, лакокрасочных материалов.

Для достижения поставленной цели был разработан удобный графический метод качественной оценки совместимости взаимодействующих компонентов, входящих в единый компо-