

УДК 621.762

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ УСЛОВИЕ ОБРАЗОВАНИЯ СОЕДИНЕНИЯ МЕЖДУ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ОСНОВОЙ И ПОРОШКОВЫМ ПОКРЫТИЕМ НА СТАДИИ ИХ СОВМЕСТНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ В ТЕХНОЛОГИЯХ ПЛАКИРОВАНИЯ

Ю. Л. БОБАРИКИН, Н. В. ИНОЗЕМЦЕВА

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

### Введение и постановка задачи

Способы нанесения металлических порошковых покрытий на металлическую основу в технологиях плакирования методом совместной пластической деформации наносимого и покрываемого металлов являются высокопроизводительными и ресурсосберегающими. Известные технологии плакирования обеспечивают получение слоистых коррозионностойких, антифрикционных, электротехнических, инструментальных, износостойких и термобиметаллических материалов.

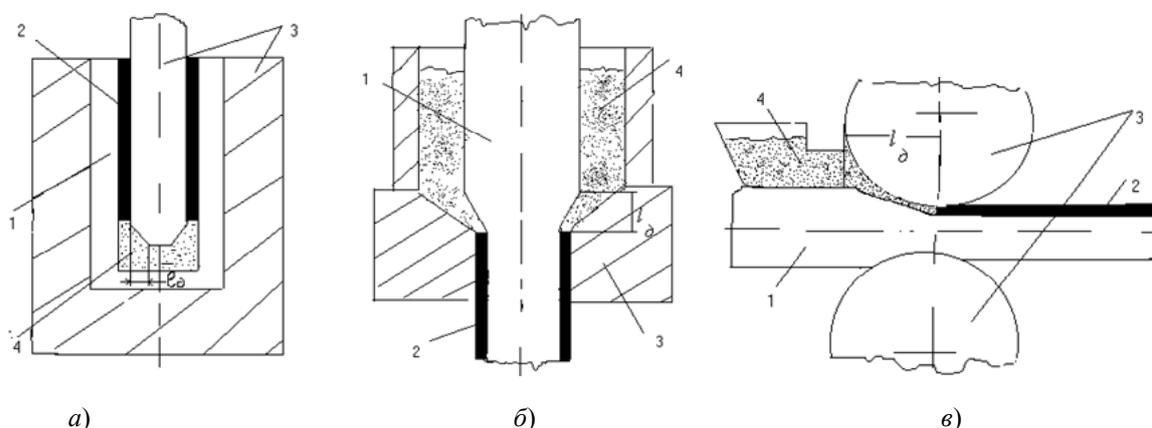


Рис. 1. Схемы способов совместной пластической деформации металлической основы и порошка: 1 – металлическая основа; 2 – покрытие; 3 – инструмент; 4 – порошок

Технология плакирования металлов состоит из подготовки поверхности основы и порошка, совместной пластической деформации металлической основы и порошка, а также дополнительной обработки.

На стадии совместной пластической деформации основы и порошка формируется геометрия основы и покрытия из порошка в изделии, обеспечивается их соединение. Эта стадия выполняется с помощью операций обработки металлов давлением, таких как обратное выдавливание (рис. 1, а); волочение (рис. 1, б); прокатка (рис. 1, в). Дополнительная обработка обычно состоит в проведении спекания спрессованного порошкового покрытия. Она выполняется если температура совместной деформации не позволила провести это спекание.

Одной из проблем этой технологии является достижение достаточной прочности соединения слоев на стадии их совместной пластической деформации. На прочность

соединения оказывают влияние свойства металлов, основы и покрытия, а также параметры процесса совместной деформации. В связи с большим количеством влияющих факторов возникают затруднения при разработке и проведении технологических процессов плакирования, обеспечивающих прочное соединение слоев. Поэтому решение проблемы повышения прочности соединения между слоем покрытия и основой является актуальной задачей.

На основе энергетической и деформационной гипотез образования соединения между твердыми телами приводится известное условие получения качественного соединения, согласно которому длительность взаимодействия, определяемая длительностью силового воздействия при конкретном процессе, должна быть больше или равна длительности активации контактных поверхностей, которая в свою очередь должна быть больше или равна длительности релаксации напряжений в зоне соединения [1].

Согласно источникам [1]–[2], зависимости для компонент известного условия используются только для горячей совместной деформации разнородных металлов, т. е. при температурах выше температуры рекристаллизации. Они содержат эмпирические величины, предварительно получаемые экспериментально для каждого варианта плакирования. Это обстоятельство существенно ограничивает практическое использование известных зависимостей. Поэтому возникла необходимость получения зависимостей для компонент условия образования соединения, выраженных через задаваемые основные технологические параметры плакирования.

Во многих технологиях плакирования на этапе совместной пластической деформации используются температуры, которые ниже температур рекристаллизации соединяемых металлов. Для этих случаев условие образования соединения не изучено.

Цель настоящей работы – выявление закономерностей образования соединения между металлической основой и порошковым покрытием на стадии их совместной пластической деформации в технологиях плакирования металлов, выраженных через технологические параметры.

#### **Аналитическое определение параметров условия образования соединения**

При плакировании материал основы должен быть менее пластичным сравнительно с материалом покрытия. Поэтому интенсивность пластической деформации основы будет меньше чем покрытия. Это исключает трещинообразование в покрытии. В этом случае необходимо добиться достаточной активации поверхности основы для ее соединения с покрытием. Так как покрытие более пластично относительно основы, то достаточно получить релаксацию внутренних напряжений в покрытии. Более длительная релаксация внутренних напряжений в менее пластичной основе окажется не обязательной, т. к. не приведет к отслоению покрытия. Вследствие этого для получения качественного соединения необходимо выполнение условия:

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

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

Время совместной пластической деформации определяется по зависимости

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

где  $l_d$  – длина очага деформации, м (рис. 1);  $v_n$  – скорость процесса деформирования,  $\text{м/с}$ .

Предполагается, что активными центрами при образовании соединения являются дислокации с полем механического напряжения на поверхности основы. Поэтому длительность активации всей поверхности основы при любом способе обработки металлов давлением можно выразить в виде [1]:

$$t_a = \frac{L \cdot b}{v \cdot S}, \quad (3)$$

где  $L$  – путь движения дислокации до барьера в материале основы, м, который определяется по известной зависимости [1];  $b$  – модуль вектора Бюргера для материала основы, м;  $v$  – скорость деформации материала основы в зоне соединения,  $1/\text{с}$ ;  $S$  – изменение площади активного центра в месте выхода дислокаций к поверхности основы в зоне соединения,  $\text{м}^2$ .

Длительность релаксации остаточных напряжений в покрытии определяется по формуле:

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

где  $t_0$  – период собственных колебаний атомов около равноосного положения,  $t_0 = 10^{-13}$  с,  $k^*$  – постоянная Больцмана,  $k^* = 1,38 \text{ Дж/К}$ ;  $T$  – средняя объемная температура в зоне деформации, К;  $U$  – энергия активации процесса, контролирующего релаксацию внутренних напряжений, которую предполагается определять для процессов, протекающих при  $T \leq 0,5 T_{\text{пл}}$  как энергию термически активируемых процессов (поперечное скольжение, пересечение дислокаций, трение в решетке, обусловленное силами Пайерлса), а для процессов при  $T > 0,5 T_{\text{пл}}$  – как энергию активации самодиффузии [3].

Плотность дислокаций в зоне контакта  $\rho_d$ , которая необходима при расчете параметров  $S$ ,  $L$  определяется по расчетной зависимости [4]:

$$\rho_d = \frac{v_n \cdot \gamma_{\max} (\gamma_{\max} + 2)}{2 \cdot l_d \cdot (\gamma_{\max} + 1) b \cdot v_{\text{зв}} \cdot \exp\left(-\frac{A}{k^* \cdot T}\right)}, \quad (5)$$

где  $\gamma_{\max}$  – максимальная угловая деформация на поверхности металлической основы в зоне соединения, равная  $\gamma_{\max} \approx \gamma_i$ ;  $\gamma_i$  – интенсивность поверхностной сдвиговой деформации основы для каждого процесса плакирования;  $v_{\text{зв}} = 5 \cdot 10^3 \text{ м/с}$  – скорость звука в материале, где движутся дислокации;  $T$  – средняя объемная температура в зоне деформации, К;  $A$  – константа материала, которую предлагается определять как свободную энергию образования перегибов дислокаций, Дж [5].

Изменение средней объемной температуры в зоне деформации в процессе формоизменения зависит от тепловыделения при деформации и интенсивности теплоотвода от этой зоны. Объем металлической основы в очаге совместной деформации составляет от 97,5 до 99,5 %. Порошковое покрытие толщиной от 0,05 до 0,3 мм при

плакировании выполняет роль твердой смазки. Деформация любого порошкового тела всегда сопровождается низким средним объемным тепловыделением, вследствие имеющейся пористости порошковой уплотненной среды. В этой связи деформационное тепловыделение можно учесть только в металлической основе. На основании этих предположений была получена расчетная формула для данной температуры в зоне деформации [4]:

$$T = T_0 + \frac{(A_T + A_n)t_d \cdot \xi}{2c_o \rho_o V + t_d \nu_n (c_1 \rho_1 S_k + c_2 \rho_2 S'_k + c_o \rho_o S''_k)}, \quad (6)$$

где  $A_T$  – работа сил контактного трения, определяемая для используемого способа совместной пластической деформации порошка и основы в технологиях плакирования, Дж;  $A_n$  – работа пластической деформации, определяемая для используемого способа совместной пластической деформации порошка и основы в технологиях плакирования, Дж;  $c_o$  – удельная теплоемкость материала основы Дж/(кг К);  $\rho_o$  – плотность материала основы, кг/м<sup>3</sup>;  $T_0$  – начальная температура, К;  $V$  – объем очага деформации, м<sup>3</sup>;  $S_k$  – площадь поверхности контакта очага деформации с воздухом, м<sup>2</sup>, которая определяется из геометрических особенностей очага деформации для используемого способа плакирования;  $c_1, \rho_1$  – соответственно удельная теплоемкость и плотность воздуха;  $S'_k$  – площадь поверхности контакта очага деформации с инструментом, м<sup>2</sup>, которая определяется из геометрических особенностей очага деформации для используемого способа плакирования;  $c_2, \rho_2$  – соответственно удельная теплоемкость и плотность материала инструмента;  $S''_k$  – площадь поверхности контакта очага деформации с недеформируемой частью заготовки, м<sup>2</sup>, которая определяется из геометрических особенностей очага деформации для используемого способа плакирования.

### Экспериментальная часть

Экспериментальное исследование условия образования соединения в процессах плакирования проводилось выполнением способов совместной пластической деформации в технологиях плакирования обратным выдавливанием, волочением и прокаткой с различными режимами.

Экспериментальные исследования способа плакирования обратным выдавливанием осуществлялись на гидравлической испытательной машине с максимальным усилием 500 кН с помощью специально разработанного и изготовленного устройства. В качестве основы использовались заготовки из стали 20 (Ст. 20) в отожженном состоянии в виде цилиндров диаметром 8 мм и высотой 10 мм. В качестве порошков, применяемых для формирования плакирующих покрытий, использовались порошки никеля, алюминия, олова, меди и хрома. Был проведен расчет условия образования соединения для параметров процесса совместной пластической деформации основы и покрытия при плакировании обратным выдавливанием. Полученные экспериментальные и теоретические результаты (табл. 1) свидетельствуют об их согласовании для процесса плакирования обратным выдавливанием.

Таблица 1

№ опыта	Покрытие	$\varepsilon$ , %	$R$ , мм	$v_n$ , мм/с	$T_0$ , К	Расчетное условие образования соединения			Экспериментальный результат
						$t_d$	$t_a$	$t_p$	
1	Cu	12	20	2,2	293	$1,284 \geq 7,39 \cdot 10^{-3} \leq 7,827 \cdot 10^7$			–
2	Sn					$1,284 \geq 7,39 \cdot 10^{-3} \leq 2,76 \cdot 10^3$			–
3	Al					$1,284 \geq 7,39 \cdot 10^{-3} \leq 3,71 \cdot 10^8$			–
4	Ni					$1,284 \geq 7,39 \cdot 10^{-3} \leq 3,012 \cdot 10^{23}$			–
5	Cr					$1,284 \geq 7,39 \cdot 10^{-3} \leq 2,454 \cdot 10^4$			–
6	Cu	12	20	2,2	573	$1,284 \geq 6,673 \cdot 10^{-5} \geq 2,887 \cdot 10^{-5}$			+
7	Sn					$1,284 \geq 6,673 \cdot 10^{-5} \geq 4,6 \cdot 10^{-7}$			+
8	Al					$1,284 \geq 6,673 \cdot 10^{-5} \geq 5,6 \cdot 10^{-5}$			+
9	Ni					$1,284 \geq 6,673 \cdot 10^{-5} \leq 65,674$			–
10	Cr					$1,284 \geq 6,673 \cdot 10^{-5} \leq 1,312 \cdot 10^9$			–
11	Cu	12	20	4,0	293	$0,706 \geq 5,48 \cdot 10^{-3} \leq 7,365 \cdot 10^7$			–
12	Sn					$0,706 \geq 5,48 \cdot 10^{-3} \leq 2,766 \cdot 10^3$			–
13	Al					$0,706 \geq 5,48 \cdot 10^{-3} \leq 3,511 \cdot 10^8$			–
14	Ni					$0,706 \geq 5,48 \cdot 10^{-3} \leq 2,312 \cdot 10^{23}$			–
15	Cr					$0,706 \geq 5,48 \cdot 10^{-3} \leq 1,36 \cdot 10^{41}$			–
11	Cu	12	20	4,0	573	$0,706 \geq 4,949 \cdot 10^{-5} \geq 2,956 \cdot 10^{-5}$			+
12	Sn					$0,706 \geq 4,949 \cdot 10^{-5} \geq 4,604 \cdot 10^{-7}$			+
13	Al					$0,706 \geq 4,949 \cdot 10^{-5} \leq 5,549 \cdot 10^{-5}$			–
14	Ni					$0,706 \geq 4,949 \cdot 10^{-5} \leq 62,865$			–
15	Cr					$0,706 \geq 4,949 \cdot 10^{-5} \leq 1,19 \cdot 10^9$			–

В таблице знак «+» соответствует наличию соединения при экспериментальном исследовании, а знак «–» его отсутствию.

Экспериментальное исследование для способа плакирования волочением проводилось на волочильном стане однократного волочения [6]. Качество получаемых плакированных соединений 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. Был проведен расчет условия образования соединения для параметров процесса плакирования волочением. Полученные экспериментальные и теоретические результаты (табл. 2) свидетельствуют об их согласовании для процесса плакирования волочением.

Таблица 2

№ опыта	Покрытие	$\varepsilon$ , %	$R$ , мм	$v_n$ , мм/с	$T_0$ , К	Расчетное условие образования соединения			Экспериментальный результат
						$t_d$	$t_a$	$t_p$	
1	Sn	12	10	0,2	293	$11,188 \geq 0,038 \leq 2,766 \cdot 10^4$			–
2	Zn					$11,188 \geq 0,038 \leq 5,563 \cdot 10^4$			–
3	Sn	12	10	1,0	293	$2,238 \geq 0,017 \leq 2,766 \cdot 10^3$			–
4	Zn					$2,238 \geq 0,017 \leq 5,563 \cdot 10^4$			–
5	Sn	12	10	0,2	643	$11,188 \geq 1,997 \cdot 10^{-4} \geq 3,106 \cdot 10^{-6}$			+
6	Zn					$11,188 \geq 1,997 \cdot 10^{-4} \geq 1,267 \cdot 10^{-5}$			+
7	Sn	12	10	0,2	653	$11,188 \geq 1,867 \cdot 10^{-4} \geq 2,385 \cdot 10^{-6}$			+
8	Zn					$11,188 \geq 1,867 \cdot 10^{-4} \geq 9,524 \cdot 10^{-6}$			+

Эксперименты по плакированию прокаткой проводили на специально сконструированной и изготовленной установке [7]. В качестве основы использовалась полоса стали 0,8кп с размером сечения  $15 \times 0,8$  мм. В качестве покрытия – металлический порошковый материал на основе железа. Процесс электроимпульсного спекания осуществлялся при температуре 1500 К и постоянном давлении 300 МПа.

Был проведен расчет условия образования соединения для параметров способа плакирования прокаткой. Полученные экспериментальные и теоретические результаты (табл. 3) свидетельствуют об их согласовании для процесса плакирования прокаткой.

Таблица 3

№ опыта	Покрытие	$\varepsilon$ , %	$R$ , мм	$v_n$ , мм/с	$T_0$ , К	Расчетное условие образования соединения			Экспериментальный результат
						$t_d$	$t_a$	$t_p$	
1	Fe	1,68	50	0,75	1500	$0,733 \geq 1,488 \cdot 10^{-6} \geq 1,291 \cdot 10^{-6}$			+
2	Fe	1,75	50	0,82	1500	$0,684 \geq 1,397 \cdot 10^{-6} \geq 1,291 \cdot 10^{-6}$			+
3	Fe	1,8	50	0,88	1500	$0,647 \geq 1,323 \cdot 10^{-6} \geq 1,291 \cdot 10^{-6}$			+
4	Fe	1,84	50	0,65	1500	$0,885 \geq 4,509 \cdot 10^{-7} \leq 1,291 \cdot 10^{-6}$			–
5	Fe	2,1	50	0,88	1500	$0,699 \geq 6,965 \cdot 10^{-7} \leq 1,291 \cdot 10^{-6}$			–

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования подтвердили возможность практического использования полученных аналитических зависимостей, выраженных через технологические параметры, учитывающие свойства обрабатываемых материалов.

**Выводы:**

Условием образования соединения между металлической основой и порошковым покрытием на стадии их совместной пластической деформации в технологиях плакирования является превышение продолжительности совместной деформации порошка и основы над продолжительностью активации контактной поверхности основы, которая должна быть больше продолжительности релаксации остаточных напряжений в порошковом покрытии.

Определено, что для характеристики свойств металла основы необходимо использовать энергию одиночных перегибов дислокаций этого металла, а для характеристики свойств материала порошкового покрытия необходимо использовать энергию активации, контролирующей релаксацию остаточных напряжений в материале покрытия.

**Литература**

1. Каракозов, Э. С. Диффузионная сварка титана / Э. С. Каракозов, Л. М. Орлова, В. В. Пешков. – Москва : Металлургия, 1977. – 272 с.
2. Кочергин, К. А. Сварка давлением / К. А. Кочергин. – Ленинград : Машиностроение, 1972. – 216 с.
3. Гарафало, Ф. Законы ползучести и длительной прочности металлов и сплавов / Ф. Гарафало; пер. с англ. – Москва : Металлургия, 1968. – 304 с.
4. Бобарикин, Ю. Л. Аналитическое определение времени активации контактных поверхностей при плакировании / Ю. Л. Бобарикин, Н. В. Селивончик, А. Н. Швецов // Кузнечно-штамповочное производство. – 2002. – № 11. – С. 27–31.
5. Хирт, Дж. Теория дислокаций / Дж. Хирт, И. Лоте; пер. с англ.; под ред. Э. М. Надгорного и Ю. А. Осипьяна. – Москва : Атомиздат, 1972. – 600 с.
6. Иноземцева, Н. В. Анализ условия соединения покрытия с основой при плакировании волочением / Н. В. Иноземцева, Ю. Л. Бобарикин, О. М. Валицкая // Материалы, технологии, инструменты. – 2004. – Т. 9. – № 1. – С. 30–35.
7. Технология нанесения порошковых покрытий на стальную полосу / Бобарикин Ю. Л. и [др.] // Кузнечно-штамповочное производство. – 2003. – № 16. – С. 30–33.

*Получено 21.12.2005 г.*