

УДК 621.762

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ КРИТИЧЕСКОЙ УПРУГОЙ ОСТАТОЧНОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ПЛАКИРОВАНИИ ПОРОШКОВЫМИ ПОКРЫТИЯМИ (ОБЗОР)

А. М. УРБАНОВИЧ, Ю. Л. БОБАРИКИН, С. В. ШИШКОВ

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

Ключевые слова: упругая деформация, плакирование, релаксация, схватывание, узел схватывания.

Введение

Процесс плакирования порошковыми покрытиями металлической основы заключается в совместной пластической деформации основы и металлического порошка деформирующим инструментом. Совместная пластическая деформация позволяет сформировать порошковое покрытие и закрепить его на металлической основе. Покрытие может иметь различное функциональное назначение, определяемое свойствами порошка. Наличие металлической основы способствует повышению конструкционной прочности получаемого слоистого материала и экономии дорогостоящих материалов.

Целью исследования является определение величины критической упругой остаточной деформации в зоне контакта.

Релаксационные процессы оказывают влияние на образование соединения между плакирующим слоем и основой. Определение закономерностей их протекания будет способствовать рациональному планированию режимов обработки, обеспечивающих качественное соединение и, как следствие, будет обеспечивать достаточные эксплуатационные свойства получаемых слоистых материалов.

Основная часть

Можно считать теоретически доказанным и экспериментально подтвержденным представление о том, что процесс плакирования металлов происходит в три стадии [1]:

1) образование физического контакта, т. е. сближение атомов соединяемых материалов на расстояние, при котором возникает физическое взаимодействие (обусловленное дисперсионными силами типа сил Вандер-Ваальса), или на расстояние, при котором возможно слабое взаимодействие. Это осуществляется за счет пластической деформации обоих из соединяемых материалов;

2) активация контактных поверхностей, т. е. образование активных центров. При соединении одноименных материалов активация контактных поверхностей происходит одновременно с образованием физического контакта в процессе их сближения при смятии отдельных микровыступов за счет пластической деформации;

3) объемное взаимодействие, которое наступает с момента образования активных центров.

На последней стадии происходит развитие взаимодействия соединяемых материалов как в плоскости контакта с образованием прочных химических связей, так и в объеме зоны контакта. Этот процесс протекает на активных центрах, представляю-

щих собой поля упругих искажений кристаллической решетки, в частном случае – вокруг дефектов структуры (дислокаций, вакансий). Для обеспечения требуемой прочности соединения необходимо дальнейшее развитие релаксационных процессов (типа рекристаллизации или гетеродиффузии).

Процесс плакирования металлическим порошками может ограничиваться образованием качественного соединения на стадии объемного взаимодействия схватыванием контактных поверхностей, дальнейшего развития деформации и закончиться образованием в зоне контакта общих зерен или новых фаз. Данный процесс может характеризоваться либо малой длительностью, либо низкой температурой ($< 0,5T_{пл}$) процесса. При таких условиях релаксационные процессы на стадии объемного взаимодействия не получают развития и заканчиваются схватыванием контактных поверхностей.

Общее условие получения качественного соединения при плакировании имеет вид [2]:

$$\tau_d \geq \tau_c \geq \tau_p, \quad (1)$$

где τ_d – время совместной пластической деформации или время перемещения биметаллического материала через зону деформации, с; τ_c – время активации поверхности основы в зоне соединения, с; τ_p – время релаксации остаточных напряжений в покрытии, с.

Необходимость выполнения данного условия очевидна. Если $\tau_d < \tau_c$, то за данный период взаимодействия не все атомы контактных поверхностей успеют образовать межатомные связи. Левую часть неравенства (1) следует понимать в том смысле, что активация и схватывание контактных поверхностей должны произойти раньше, чем остаточные напряжения достигнут уровня, при котором станет возможным разрыв образовавшихся связей. Следовательно, если не выполняется правая часть условия (1) и $\tau_c < \tau_p$, то остаточные напряжения в зоне контакта частично или полностью разорвут образовавшиеся межатомные связи.

Время полного схватывания контактных поверхностей определяется необходимостью активации всей контактной поверхности, так как атомы, достигшие активного состояния, мгновенно образуют межатомные связи, т. е. $\tau_c = \tau_p$.

Кривая релаксации в координатах «остаточные напряжения» (σ_0) и «время» (τ) (рис. 1) отчетливо разбита на два участка, отвечающих двум периодам релаксации [3].

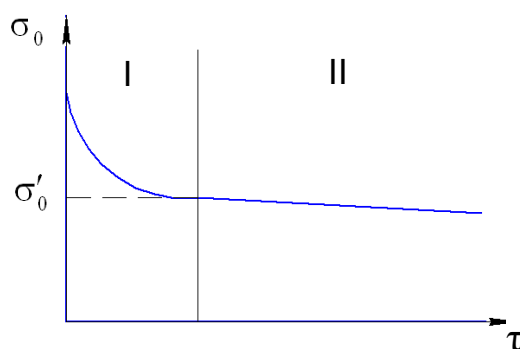


Рис. 1. Первичная кривая релаксации

И. А. Одингом [4] были предложены следующие уравнения первого и второго периодов релаксации:

$$\sigma_I = \sigma_0 e^{-\frac{R\tau}{1+\rho\tau}}; \quad (2)$$

$$\sigma_{II} = \sigma'_0 e^{-\frac{\tau}{\tau_0}}; \quad (3)$$

где R и ρ – постоянные коэффициенты, зависящие от свойств металла; σ_0 и σ'_0 – начальные напряжения первого и второго периодов релаксации.

Ю. Л. Красулин в работе [5] при проведении экспериментов по соединению металлов пластической деформацией сделал важные выводы:

1) с увеличением давления при соединении металлов происходит рост величины остаточных напряжений до определенного предела, затем спад;

2) в процессе соединения при постоянном давлении остаточные напряжения уменьшаются по экспоненциальному закону. Скорость уменьшения напряжений увеличивается с увеличением деформационной температуры.

По мнению И. А. Одингга [4], релаксацию следует рассматривать как нарастание пластической деформации при одновременном и равном падении упругой деформации. Отсюда дается зависимость

$$\sigma(t) = E[\varepsilon_0 - \varepsilon_p(t)], \quad (4)$$

где ε_0 – доля упругой деформации, остающейся к моменту t ; $\varepsilon_p(t)$ – величина накопленной пластической деформации к тому же моменту t ; E – модуль нормальной упругости.

Эта зависимость показывает, что напряжение при релаксации снижается с ростом пластической деформации. Рост же пластической деформации во времени есть ползучесть. Поэтому процесс, который происходит при релаксации, представляет собой ползучесть при напряжении, которое уменьшается во времени пропорционально нарастающей пластической деформации.

При проведении опытов было установлено, что с течением времени, прошедшего после плакирования, прочность соединения понижается, а в ряде случаев соединение разрушается. Д. Мартин предполагает, что постепенное понижение прочности соединения связано с нарушением геометрической формы поверхностей излома, затрудняющим сближение до физического контакта. С точки зрения физических основ холодной сварки наиболее существенным в работе [6] является экспериментальное подтверждение возможности схватывания в холодную практически всех металлов. Однако их свариваемость, оцениваемая способностью к образованию прочного соединения, весьма различна. Это можно объяснить тем, что для некоторых металлов и сплавов узлы схватывания, образовавшиеся при совместной деформации, после снятия нагрузки, вызывающей эту деформацию, разрушаются. Ф. Боуден и Г. Роу при анализе такого разрушения исходили из модели, в которой сферический выступ радиусом R (рис. 2, а) вдавливаются усилием с P в пластинку из того же металла с пределом текучести σ_T [7]. В результате пластической деформации в пластинке появится отпечаток, диаметр которого d_0 можно найти из соотношения

$$P = \frac{\pi d_0^2}{4} \sigma_T. \quad (5)$$

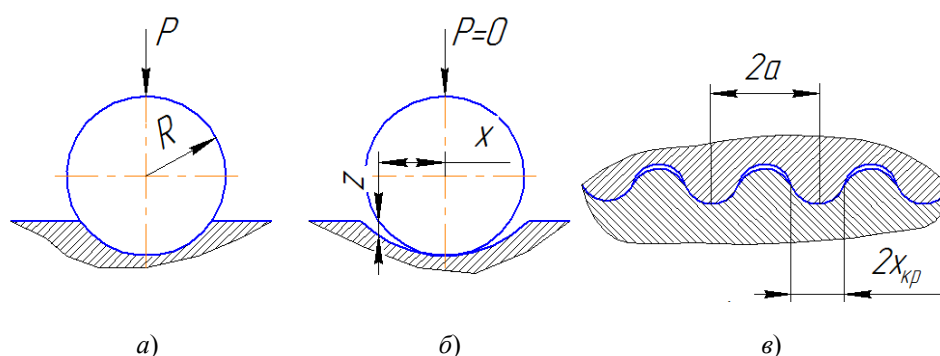


Рис. 2. Схема упругопластической деформации при вдавливании в плоскость сферических выступов: а – образование отпечатка под нагрузкой; б – упругое изменение формы; в – вдавливание серии смежных сферических выступов

Далее можно предположить, что на сферическом выступе и пластинке имеются неровности, которые под действием силы P образуют в отдельных точках на поверхности отпечатка узлы схватывания. Если эти узлы оказались недостаточно прочными, то после снятия усилия P в результате упругих деформаций сферический выступ и отпечаток изменяют кривизну так, что их радиусы (рис. 2, б) по формуле Герца будут связаны соотношением

$$\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} = \frac{11}{2} \frac{P}{Ed_0^3}, \quad (6)$$

где E – модуль упругости; r_1 , r_2 – радиус отпечатков до и после снятия нагрузки.

При этом между выступом и пластинкой появится зазор z , на расстоянии x от оси выступа равный:

$$z = \frac{x^2}{2} \left(\frac{r_1 - r_2}{r_1 r_2} \right) \approx \frac{3xP}{Ed_0^3}, \quad (7)$$

где x – расстояние, на котором начинает образовываться зазор между двумя взаимодействующими телами.

Если по Д. Тэйбору допустить, что данный металл в узле схватывания может растянуться без разрушения на $z_{кр}$, в пределах которой возможно для этого металла сохранение неразрушенных узлов схватывания после снятия P , определится по формуле

$$z_{кр} = \frac{3P}{Ed_0^3} x_{кр}^2, \quad (8)$$

где $x_{кр}$ – расстояние, на котором начинается образование критического зазора между двумя взаимодействующими телами, достаточного для разрыва образовавшегося соединения.

Таким образом, согласно [7], узлы схватывания могут разрушаться (за пределами $x > x_{кр}$) в результате деформаций, возникающих после снятия нагрузки. С. Б. Айнбиндер [8], рассматривая процессы холодной сварки с учетом этих явлений, отмечает влияние запаса упругой энергии, накапливаемой в упругом образце, на условиях со-

хранения узлов схватывания после снятия нагрузки. С уменьшением толщины материала холодная сварка облегчается [8]. Роль остаточных напряжений подтверждается в процессе так называемой «грушевидной» холодной сварки [9], при которой форма соединения, по существу, исключает возможность его разрушения после снятия сварочного усилия; этот процесс позволяет сваривать сталь без особых затруднений.

В действительности при плакировании имеется не один, а много выступов, вдавливание которых можно представить схемой на рис. 2, в. Вероятность получения прочного соединения по всей поверхности должна увеличиваться при уменьшении расстояния $2a$ между соседними выступами (если $a > x_{кр}$, то всегда $z < z_{кр}$ и узлы схватывания после снятия нагрузки не должны разрушаться) и при увеличении $z_{кр}$.

Выполнение первого условия, по мнению автора работ [8], связано с технологией сварки. Величину a можно уменьшить лучшим выравниванием поверхности за счет увеличения степени деформации. Величина $z_{кр}$ в основном зависит от свойств свариваемого металла. Очевидно, что субмикроскопические узлы схватывания могут чередоваться с соизмеримыми с ним несваренными участками, являющимися острыми концентраторами остаточных напряжений, возникающих при снятии нагрузки. Это создает опасность хрупкого разрушения, вероятность которого увеличивается из-за наклепа в зоне сварки. Поэтому чем более склонен материал к хрупкому разрушению, тем меньше $z_{кр}$ и $x_{кр}$ и, как следствие, тем больше должно быть ε_p , обеспечивающее неравенство $a < x_{кр}$.

Склонность к хрупкому разрушению можно характеризовать температурой хладнохрупкости: чем она выше, тем вероятнее хрупкое разрушение материала, и как следствие, тем труднее должна быть его холодная сварка.

По современным представлениям склонность к хрупкому разрушению металла тем больше, чем выше напряжение ($\sigma_{s,n}$), необходимое для движения в нем дислокаций. При большом $\sigma_{s,n}$ велика вероятность разрушения до начала пластической деформации, т. е. хрупкого разрушения. Напряжение $\sigma_{s,n}$ можно рассматривать как сумму [11]:

$$\sigma_{s,n} = \sigma_n + \sum \sigma_{пр} + \sigma_d, \quad (9)$$

где σ_n – напряжение, необходимое для перемещения единичной дислокации в кристалле, свободном от других дефектов строения (так называемое напряжение Пайерлса); $\sum \sigma_{пр}$ – напряжение, необходимое для преодоления сил торможения движения дислокации, создаваемых концентрирующимися у дислокации примесными атомами внедрения (облаком Коттрелла); σ_d – сопротивление движению дислокаций, связанное с тормозящим действием других дислокаций (параллельных, пересекающихся), имеющих в металле.

Из представлений о влиянии остаточных напряжений на качество соединения металлов пластической деформацией связь условий холодной сварки с хладнохрупкостью материала носит феноменологический характер и ее следует рассматривать лишь как рабочую гипотезу.

Используя данную гипотезу и имея два тела, которые деформируются пластически, можно предложить модель, представленную на рис. 3.

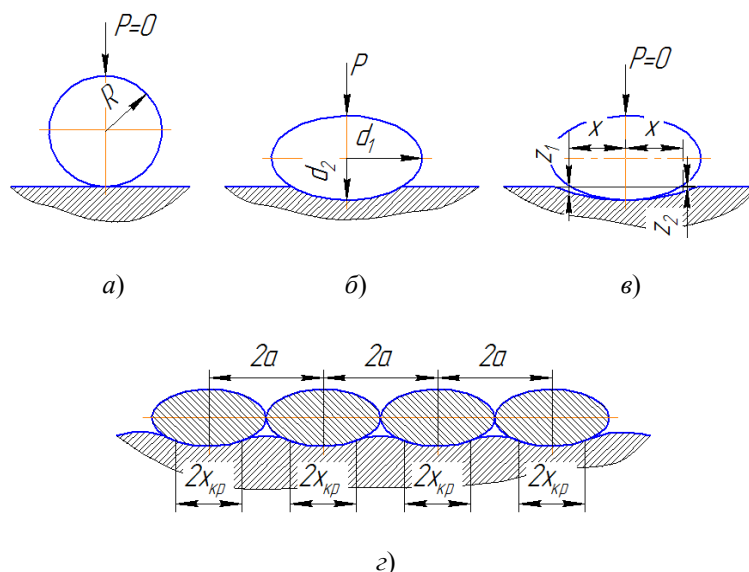


Рис. 3. Схема упругопластической деформации при вдавливании в плоскость металлического порошка: *а* – положение подложки и порошка до приложения нагрузки; *б* – образование отпечатка под нагрузкой; *в* – упругое изменение формы подложки и порошка; *г* – вдавливание металлического порошка

Так как в процессе плакирования деформируются как основа, так и наносимое покрытие, то на величину $z_{кр}$ будут влиять свойства обоих материалов [13].

Используя уравнения механики контактного взаимодействия [12], с учетом пластической деформации двух взаимодействующих тел, можно применить выражение

$$\frac{1}{E} = \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2}, \quad (10)$$

где ν_1 и ν_2 – коэффициенты Пуассона контактирующих материалов; E_1 и E_2 – модули упругости контактирующих материалов.

С учетом вышеизложенного металл покрытия и основы в узлах схватывания может растянуться без разрушения на определенную критическую величину.

На эту критическую величину будут влиять такие факторы как химическая совместимость соединяемых металлов, подготовка металлической основы перед плакированием, технология нанесения и др.

Предполагается, что в местах контакта основы и покрытия величина $z_{кр}$ будет определяться как сумма растяжений после снятия нагрузки.

На основании формулы (8) получена зависимость для определения величины критического зазора в узлах схватывания металла покрытия и основы без разрушения после снятия нагрузки:

$$z_{кр} = \frac{3Px_{кр}^2}{E_1 d_0^3} + \frac{3Px_{кр}^2}{E_2 d_0^3},$$

где P – усилие деформирования; $x_{кр}$ – расстояние, на котором начинает образование критического зазора между двумя взаимодействующими телами, достаточного для разрыва образовавшегося соединения; E_1 и E_2 – модули упругости контактирующих материалов; d_0 – диаметр отпечатка порошка в основе.

Заключение

В результате выполненных исследований проведен обзор имеющихся современных представлений о влиянии остаточных деформаций на условие отсутствия разрушения соединения основы и плакированного порошкового покрытия.

На основании исследований получена зависимость, позволяющая определить величину критической упругой остаточной деформации в зависимости от упругих свойств соединяемых материалов, энергосиловых параметров и геометрии зоны контакта.

Литература

1. Бобарикин, Ю. Л. Основные закономерности плакирования стали прокаткой металлическими порошками / Ю. Л. Бобарикин, Н. И. Стрикель, А. М. Урбанович // *Материалы, технологии, инструменты*. – 2000. – Т. 5, № 1. – С. 62–65.
2. Бобарикин, Ю. Л. Исследование условия сцепления между металлическими слоями, соединяемыми процессом прокатки / Ю. Л. Бобарикин, Н. В. Иноземцева, А. Н. Швецов // *Материалы, технологии, инструменты*. – 2005. – Т. 10, № 3. – С. 34–36.
3. Шоршоров, М. Х. Физические и химические основы способов соединения разнородных материалов / М. Х. Шоршоров // *ВИНИТИ. Metallurgy, сварка*. – 1989. – 179 с.
4. Теория ползучести металлов / И. А. Одинг [и др.]. – М. : *Металлургиздат*, 1959. – 488 с. : ил.
5. Красулин, Ю. Л. Микросварка давлением / Ю. Л. Красулин, Г. В. Назаров. – М. : *Металлургия*, 1976. – 160 с.
6. Martin, D. E. Plastic strain fatigue in air and vacuum "Transactions of ASME, Journal of basic Engineering". – 1965. – № 4.
7. Bowden, F. P., Ridler, K. R. Physical properties of surfaces. "Proceedings of the Royal Society", 154A. – 1936. – № 883.
8. Гельман, А. С. Основы сварки давлением / А. С. Гельман. – М. : *Машиностроение*, 1970. – 312 с.
9. Логинов, А. Я. Холодная сварка сталей / А. Я. Логинов, В. А. Макаров, Э. Ф. Расстригина // *Свароч. пр-во*. – 1966. – № 9. – С. 10–14.
10. Астров, Е. И. Плакированные многослойные металлы / Е. И. Астров. – М. : *Металлургия*, 1965. – 215 с.
11. Трефилов, В. И. Физическая природа хрупкого разрушения / В. И. Трефилов. – К. : *Наукова думка*, 1976. – 125 с.
12. Попов, В. Л. Механика контактного взаимодействия и физика трения / В. Л. Попов. – М. : *Физматлит*, 2012. – 348 с.
13. Шишков, С. В. Модель деформации металлофторопластового полосового материала / С. В. Шишков, Ю. Л. Бобарикин, А. М. Урбанович // *Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого*. – 2016. – № 4. – С. 51–57.

Получено 03.03.2017 г.