

УДК 621.762

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ РЕЛАКСАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ В ПОКРЫТИИ ПРИ ПЛАКИРОВАНИИ ПРОКАТКОЙ

**Ю.Л. БОБАРИКИН, Н.В. ИНОЗЕМЦЕВА, А.М. УРБАНОВИЧ**  
(Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого)

*Представлена методика проведения экспериментальных исследований, целью которой являлось определение продолжительности релаксации остаточных напряжений в покрытии при плакировании прокаткой. Методика заключается в прокатке стальной полосы с порошковым покрытием и остановке вращения валков в момент, когда деформация полосы не завершена. При прокатке и после остановки валков с помощью силоизмерительной аппаратуры фиксировалось значение усилия на валках. Во время остановки в зависимости от степени падения усилия определялась продолжительность релаксации напряжений в покрытии. Согласно данной методике было проведено экспериментальное исследование продолжительности релаксации остаточных напряжений в покрытии при совместной пластической деформации стальной основы и медного порошка покрытия в технологии плакирования прокаткой. Данное исследование позволяет сделать заключение об адекватности теоретической зависимости для продолжительности релаксации остаточных напряжений в покрытии и о возможности ее практического использования при разработке технологий плакирования с помощью операций обработки металлов давлением.*

**Введение.** Производство листового, полосового, ленточного материала из обычного конструкционного материала с нанесенным покрытием функционального назначения методами плакирования позволяет получить значительную экономию в материале и ресурсе изготавливаемых из этих материалов деталей [1]. Одной из проблем при плакировании является достижение качественного соединения слоев на стадии их совместной пластической деформации, обеспечивающее схватывание покрытия с основой. На схватывание оказывают влияние свойства соединяемых металлов и параметры процесса плакирования. При плакировании материал основы должен быть менее пластичным сравнительно с материалом покрытия. Это исключает трещинообразование в покрытии. В этом случае необходимо иметь достаточную активацию поверхности основы для ее соединения с покрытием. Так как покрытие более пластично относительно основы, то достаточным является релаксация внутренних напряжений в покрытии. А достижение релаксации внутренних напряжений в менее пластичной основе при этом окажется не обязательным. Вследствие этого для получения схватывания для процессов плакирования металлических полос порошковыми покрытиями получена аналитическая зависимость [2]:

$$t_0 \geq t_a \geq t_p, \quad (1)$$

где  $t_0$  – продолжительность совместной пластической деформации или продолжительность перемещения материала через зону деформации, с;  $t_a$  – продолжительность активации поверхности менее деформируемой основы в зоне соединения, с;  $t_p$  – продолжительность релаксации остаточных напряжений в покрытии, с.

Зависимость для  $t_p$  имеет вид [3]:

$$t_p = t_0 \exp\left(\frac{U}{RT}\right), \quad (2)$$

где  $t_0$  – период собственных колебаний атомов около равновесного положения,  $t_0 = 10^{-13}$  с;  $R$  – универсальная газовая постоянная,  $R = 8,31$  Дж/(моль·К);  $T$  – средняя объемная температура в очаге деформации, К;  $U$  – энергия активации процесса, контролирующего релаксацию внутренних напряжений, которую предполагается определять для процессов, протекающих при  $T \leq 0,5T_{ni}$ , как энергию термически активируемых процессов (поперечное скольжение, пересечение дислокаций, трение в решетке, обусловленное силами Пайерлса), а для процессов при  $T > 0,5T_{ni}$  как энергию активации самодиффузии [4]. Данная энергия зависит от температуры нагрева при пластической деформации и химического состава деформируемого материала. Диапазоны изменения энергии в пределах одного металла и температуры зависят от напряжения деформации и микроструктуры металла в процессе пластической деформации. Например, для меди

при  $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$  величина такой энергии изменяется в пределах 83,8...117,32 кДж/моль; для алюминия при  $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$  – в пределах 85...126 кДж/моль; для олова при  $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$  – пределах 87,99...108,94 кДж/моль.

Для практического использования теоретической зависимости (2) необходимо дополнительно провести ее экспериментальную проверку. На основе анализа экспериментального исследования можно будет сделать заключение об адекватности указанной зависимости и о возможности ее практического использования.

**Методика исследований.** Определение продолжительности релаксации напряжений в покрытии проводилось на экспериментальной установке плакирования прокаткой. Методика заключается в прокатке стальной полосы с порошковым покрытием и остановке вращения валков в момент, когда деформация полосы не завершена (например, посередине полосы). При прокатке и после остановки валков с помощью силоизмерительной аппаратуры фиксировалось значение усилия на валках. Во время остановки в зависимости от степени падения усилия определялась релаксация напряжений в покрытии. Твердость покрытия при плакировании всегда значительно меньше твердости прокатываемой металлической полосы, поэтому релаксацией напряжений в металлической полосе пренебрегается. Принципиальная зависимость изменения усилия на валках  $P$  представлена на рисунке 1.

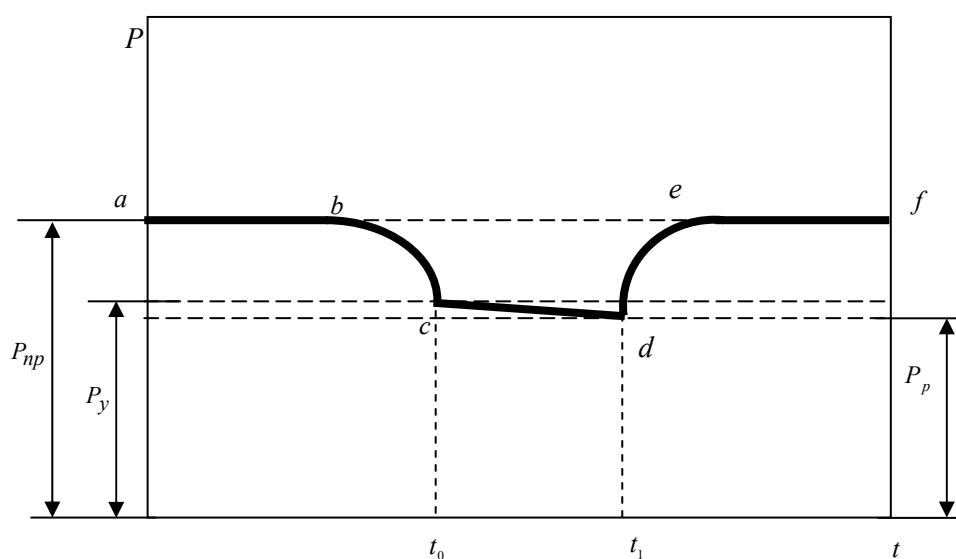


Рис. 1. Принципиальный вид кривой записи измерения усилия прокатки  $P$  с остановкой в зависимости от  $t$

Горизонтальный участок  $ab$  приведенной линии соответствуют значению усилия прокатки  $P_{np}$  при вращении валков и равномерном движении полосы.

Участок кривой линии  $bc$  соответствует времени торможения валков; участок  $cd$  – времени выдержки при неподвижных валках;  $de$  – времени разгона валков из неподвижного состояния до вращения валков с постоянной скоростью.

Горизонтальный участок  $ef$  приведенной линии соответствуют значению усилия прокатки  $P_{np}$  при вращении валков и равномерном движении полосы.

Непосредственное измерение релаксации напряжений проводили на участке  $cd$ .

После полной остановки вращения валков в точке  $c$  фиксировалось усилие  $P_y$ , с одновременной фиксацией соответствующего времени  $t_0$ . Образец выдерживался под усилием до тех пор, пока значения этого усилия не снизилось до значения  $P_p = \frac{P_y}{2,7}$ , в этот момент фиксировалось время  $t_1$ . Тогда продолжительность релаксации  $t_p = t_1 - t_0$ . При исследовании также фиксировались химический состав покрытия и температура материала.

**Экспериментальная часть.** Для исследования релаксационных процессов при плакировании прокаткой проводили совместную пластическую деформацию полосы из стали 08кп толщиной 5 мм и

медного порошка ПМС-1 при температуре  $T = 20$  °С. Изменение усилия, действующего на прокатные валки после остановки процесса в течение времени, носит линейный характер в независимости от степени деформации и скорости процесса плакирования (40 мм/с).

На рисунке 2 представлены зависимости падения упругой составляющей усилия прокатки  $P$  в течение продолжительности полной остановки процесса  $t$ , т.е. участки графика  $cd$  на рисунке 1.

На графике (см. рис. 2)  $P_y = 28,325$  кН,  $P_p = 10,452$  кН,  $t_0 = 0$ ,  $t_1 = 15,75 \cdot 10^5$ ,  $t_p = 15,75 \cdot 10^5$  с.

Для сокращения длительности измерения падения усилия на неподвижных валках использовался принцип аппроксимации линии  $cd$  графика на рисунке 1. Время выдержки ограничивали до 4 суток, а время полной релаксации напряжений определяли исходя из условного продолжения прямой линии графика.

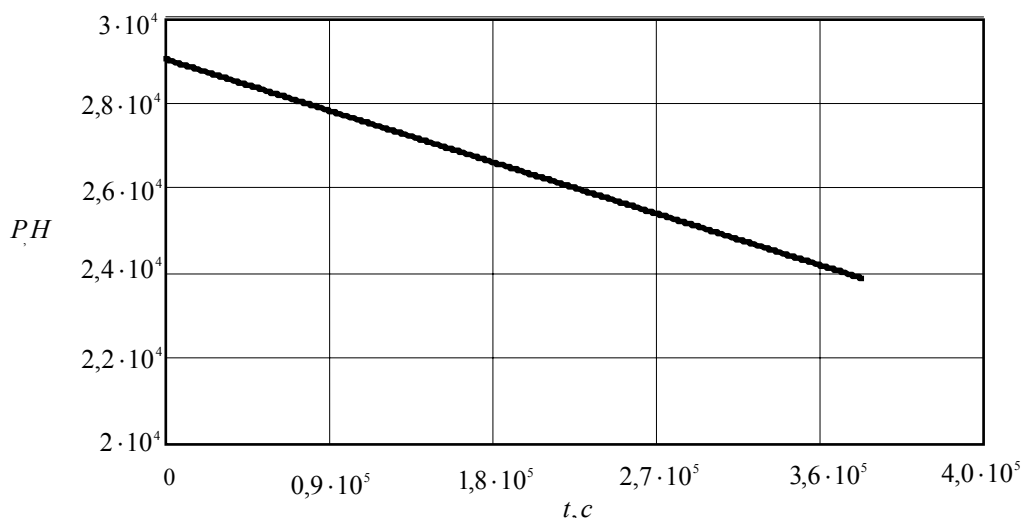


Рис. 2. Графики зависимости падения  $P$  от продолжительности остановки  $t$  при степени деформации 46 %

На рисунках 3 и 4 представлены аналогичные зависимости для других степеней деформации.

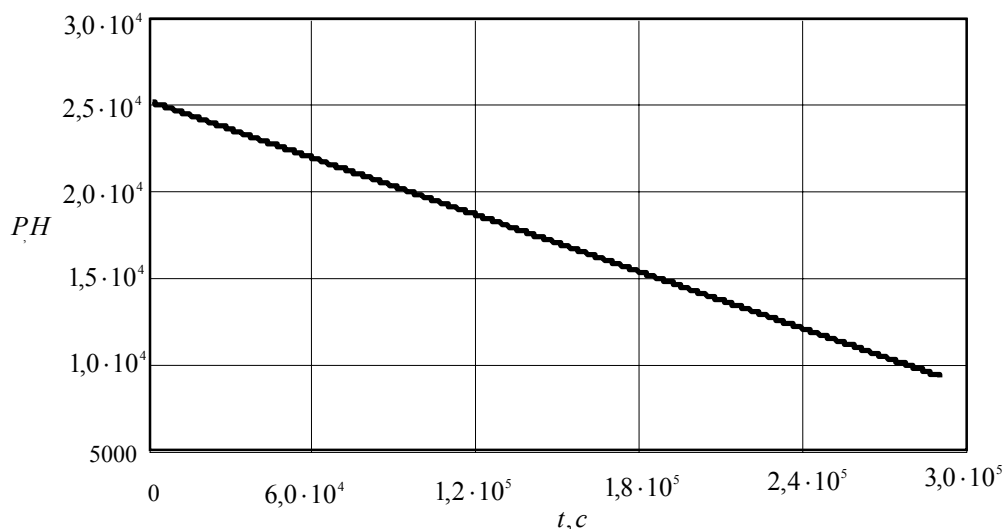


Рис. 3. Графики зависимости падения  $P$  от продолжительности остановки  $t$  при степени деформации 33 %

Степень деформации определялась для стальной полосы с насыпанным слоем медного порошка.

На графике (см. рис. 3)  $P_y = 25,233$  кН,  $P_p = 9,311$  кН,  $t_0 = 0$ ,  $t_1 = 29 \cdot 10^4$ ,  $t_p = 29 \cdot 10^4$  с.

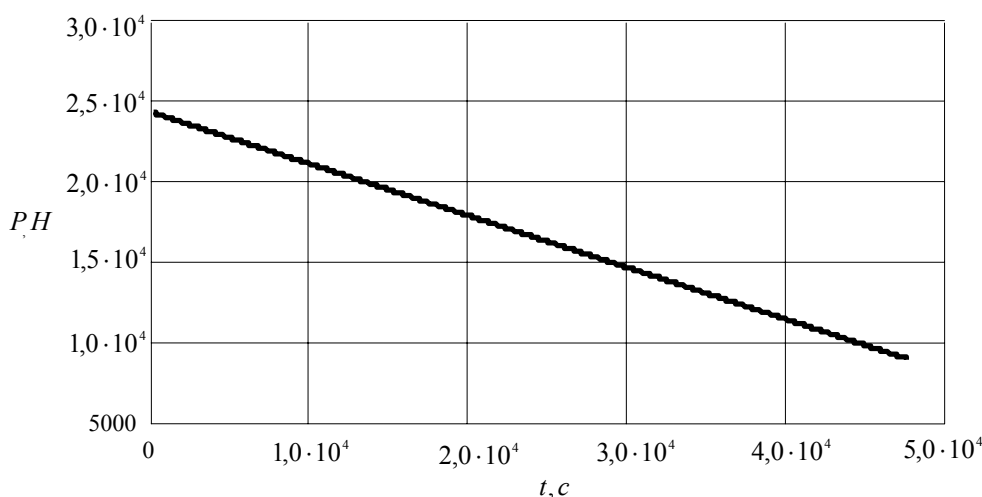


Рис. 4. Графики зависимости падения  $P$  от продолжительности остановки  $t$  при степени деформации 19 %

На графике (рис. 4)  $P_y = 24,33 \text{ кН}$ ,  $P_p = 8,979 \text{ кН}$ ,  $t_0 = 0$ ,  $t_1 = 47,536 \cdot 10^3$ ,  $t_p = 47,536 \cdot 10^3 \text{ с}$ .

Сводные результаты экспериментальных измерений  $t_p$  представлены в виде графика на рисунке 5.

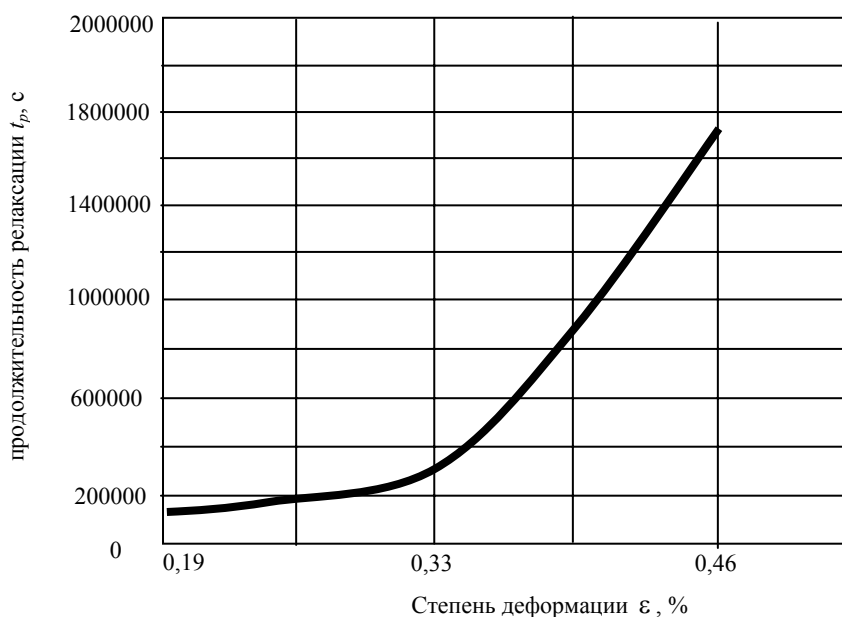


Рис. 5. График зависимости продолжительности релаксации напряжений  $t_p$  от степени деформации  $\epsilon$

С целью согласования теории и эксперимента был проведен теоретический расчет продолжительности релаксации напряжений в медном покрытии и сравнительный анализ теоретических и экспериментальных значений. Для меди энергия активации, контролирующая релаксацию напряжений при температуре  $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$  изменяется в пределах 83,8...117,32 кДж/моль. Такой энергетический интервал связан с факторами, влияющими на продолжительность релаксации напряжений. Конкретная величина этой энергии для меди при заданной температуре определяется усилием на прокатных валках и состоянием микроструктуры порошковой меди. Влияние усилия и микроструктуры на  $t_p$  в данной работе не исследуется. В этой связи факторами, влияющими на  $t_p$ , принимаются химический состав порошка покрытия и

температура деформации. Это влечет за собой теоретическое определение значения  $t_p$  в интервальном виде. Границы этого интервала определяются исходя из граничных значений энергии  $U$ . Для имеющих граничных значений энергии  $U_{min} = 83,8 \cdot 10^3$  Дж/моль и  $U_{max} = 117,32 \cdot 10^3$  Дж/моль для меди при заданной температуре по формуле (2) были определены граничные значения  $t_p$ :

$$t_p^{\min} = t_0 \exp\left(\frac{U_{\min}}{RT}\right) = 10^{-13} \exp\left(\frac{83,8 \cdot 10^3}{8,31 \cdot 293}\right) = 88,551 \text{ с};$$

$$t_p^{\max} = t_0 \exp\left(\frac{U_{\max}}{RT}\right) = 10^{-13} \exp\left(\frac{117,32 \cdot 10^3}{8,31 \cdot 293}\right) = 29,96 \cdot 10^6 \text{ с}.$$

Анализ теоретических значений  $t_p^{\min}$  и  $t_p^{\max}$  показывает, что экспериментальные значения  $t_p$  (см. рис. 5) находятся в теоретическом интервале между  $t_p^{\min}$  и  $t_p^{\max}$ .

**Заключение.** Теоретическая зависимость (2) для  $t_p$  согласовывается с результатами экспериментальных исследований и поэтому может приниматься адекватной. С целью практической возможности использования зависимости (2) без учета влияния воздействующего усилия и микроструктуры покрытия за продолжительность релаксации напряжений можно принять  $t_p = t_p^{\max}$ . Тогда теоретическое условие образования соединения  $t_o \geq t_a \geq t_p^{\max}$  получит вид, где принимаемое  $t_p^{\max}$  будет больше или равно действительному для любых условий деформации.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Стандартизация металлических материалов и изделий металлургического производства / В.В. Бойцов [и др.]; под ред. В.В. Бойцова. – М.: Изд-во стандартов, 1973. – 328 с.
2. Селивончик, Н.В. Анализ условия достижения адгезии между слоями биметалла при плакировании прокаткой / Н.В. Селивончик, Ю.Л. Бобарикин // Вестн. Гомельск. гос. техн. ун-та им. П.О. Сухого. – 2003. – № 1. – С. 29 – 38.
3. Каракозов, Э.С. Диффузионная сварка титана / Э.С. Каракозов, Л.М. Орлова, В.В. Пешков. – М.: Металлургия, 1977. – 272 с.
4. Гарафало, Ф. Законы ползучести и длительной прочности металлов и сплавов / Ф. Гарафало. – М.: Металлургия, 1968. – 304 с.

Поступила 05.07.2007