

3. Головин Ю.И., Моргунов Р.Б. // Письма в ЖЭТФ. 1995. Т. 61. Вып. 7. С. 583.
4. Golovin Yu.I., Morgunov R.B., Lopatin D.V. and Baskakov A.A. // Phys. Stat. Sol. (a). 1997. V. 160. R 3.
5. Головин Ю.И., Тюрин А.И. // Письма в ЖЭТФ. 1994. Т. 60. Вып. 10. С. 722.
6. Головин Ю.И., Тюрин А.И. // Изв. РАН (Сер. физическая). 1995. Т. 59. С. 49.
7. Головин Ю.И., Тюрин А.И. // Кристаллография. 1995. Т. 40. Вып. 5. С. 884.
8. Головин Ю.И., Тюрин А.И. // ФТТ. 1996. № 6. С. 1812.
9. Головин Ю.И., Иволгин В.И., Коренков В.В., Тюрин А.И. // ФТТ. 1997. № 2. С. 318.
10. Murakami Y., Tanaka K., Itokazu M. and Shimamoto A. // Philos. Mag. A. 1994. V. 69. № 6. P. 1131.
11. Page T.F., Oliver W.C. and Hargue C.J. // J. Mater. Res. 1992. V. 7. № 2. P. 450.
12. Boyarskaya Yu.S., Golovin Yu.I., Kats M.S., Tyurin A.I. and Shibkov // Phys. Stat. Sol. (a) 1992. V. 130. P. 319.

БЛАГОДАРНОСТИ: Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 98-02-16549).

УДК 620.178.15.4

ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОПЛАСТИЧНОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ГАЗОФАЗНЫХ ХРОМОВЫХ ПОКРЫТИЙ

© В.В. Афонин, В.Ф. Попов*

*Россия, Тамбов, Высшее военное командное училище химической защиты
* Государственный технический университет*

Afonin V.V., Popov V.F. A surface micro-plasticity research into gas-faced chromium covers. The research is conducted into samples obtained by deposition of amorphous chromium covers on an aluminium alloy. The technique of the experiments is based on micro-hardness indentation and analysis of the obtained diaphragms of loading. It is established, that the highest plasticity are characteristic of the covers with the deposition temperature of 400–430° C. Increase in temperature of the substrate leads to double reduction of the surface micro-plasticity.

Согласно современным представлениям о природе трения и изнашивания, необходимо, чтобы поверхность осаждаемого покрытия имела достаточную пластичность. Это обеспечивает соблюдение правила положительного градиента механических свойств и высокую износостойкость в условиях граничного трения.

Для исследования микропластичности и релаксационных свойств газофазных хромовых покрытий (ГХП) использовалась методика, разработанная в ГосНИИ машиноведения [1–4]. Она основывается на использовании установки УПМ-1, созданной на базе микротвердомера ПМТ-3.

Принципиальной особенностью прибора является непрерывная регистрация движения индентора в испытываемом покрытии под действием приложенной нагрузки, возрастающей от нуля до конечного значения (1,2 Н). При испытании использовалось автоматическое нагружение с плавным регулированием скорости перемещения индентора в диапазоне от $0,05 \cdot 10^{-6}$ до $10 \cdot 10^{-6}$ м/с. Скорость приложения нагрузки составила 0,04 Н/с. Пределы измеряемых глубин отпечатка – $0,1 \div 10$ мкм.

Результаты испытания представляются в виде диаграммы «Нагрузка – глубина внедрения» (рис. 1). Участок I – участок нагружения – представляет собой функциональную зависимость величины нагрузки P , необходимой для вдавливания индентора на глубину h .

На этом участке определялась микротвердость под нагрузкой («невосстановленная» микротвердость). Эта твердость служит характеристикой сопротивления материала пластической и упругой деформации в условиях вдавливания.

Участок разгрузки III дает информацию об упругих свойствах испытываемого покрытия. Изменение глу-

бины отпечатка при снятии нагрузки («упругое» восстановление) вызывается релаксацией энергии, накопленной в покрытии в процессе деформации при вдавливании индентора.

Кривая разгрузки имеет два характерных участка: 1 – начальный, близкий к линейному, где снимается 70–90 % нагрузки; 2 – заключительный, где релаксация протекает за счет необратимой деформации (пластическая деформация, хрупкое разрушение). На участке 1 происходит преимущественно релаксация упругой энергии в отличие от участка 2. Четкой границы между этими участками может и не быть.

Участок микроползучести покрытия II характеризует прирост глубины отпечатка при выдержке образцов под нагрузкой.

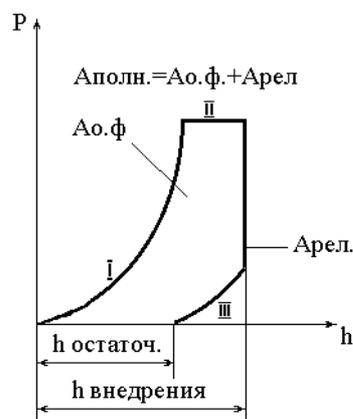


Рис. 1. Диаграмма «Нагрузка – глубина внедрения»

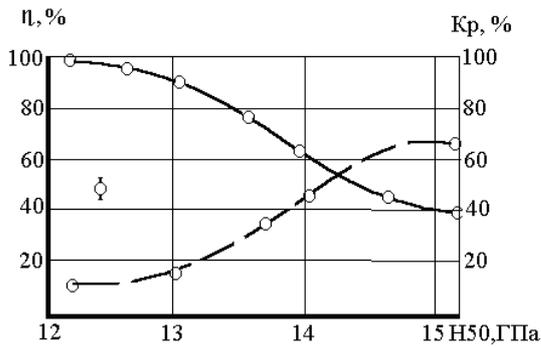


Рис. 2. Зависимость микропластичности и релаксационной способности от нагрузки

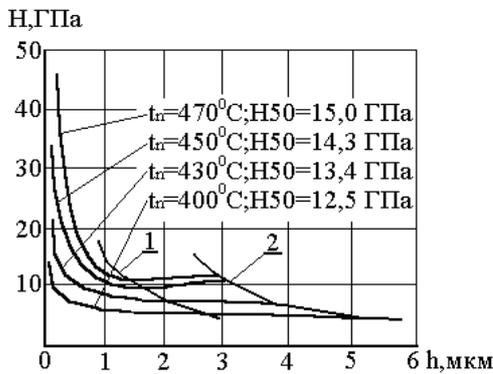


Рис. 3. Зависимость микротвердости от глубины вдавливания индентора при различных температурах

Анализ площадей диаграммы вдавливания позволяет оценить деформационную (η) и релаксационную (k_p) способности ГХП.

Деформационная способность определяется по формуле: $\eta = \frac{A_{o.ф.}}{A_{полн.}}$. Релаксационная способность вычисляется по следующему отношению:

$$k_p = \frac{A_{рел.}}{A_{полн.}} = 1 - \eta, \text{ т. к. } A_{полн.} = A_{o.ф.} + A_{рел.}, \text{ где } A_{рел.} -$$

работа сил последствия; $A_{o.ф.}$ – работа остаточного формообразования; $A_{полн.}$ – полная работа вдавливания.

Следовательно, расшифровка диаграмм вдавливания позволяет получать емкую количественную информацию о состоянии поверхностных слоев ГХП.

Для контроля микропластичности ГХП были выбраны оптимальные режимы осаждения [5] на литейный сплав алюминия АЛ9: температура подложки (t_n) – 400° и 430° С; температура испарителя (t_i) – 200° С; давление в реакционной камере (P) – 650 Па и продолжительность осаждения (τ) – 30 мин. Осаждение производилось за счет пиролиза хромосодержащей жидкости «БАРХОС».

Дополнительно исследованы режимы: t_n – 450 и 470° С для анализа структуры и морфологии поверхности ГХП, т. к. при этих температурах формируются покрытия со столбчатой структурой.

При осаждении по вышеуказанным режимам получены следующие значения толщин покрытий и микротвердостей соответственно: 34; 39; 40; 40 мкм и 12,50; 13,40; 14,30; 15,00 ГПа.

В результате обработки диаграммы нагружения получены зависимости микропластичности (η) и релаксационной способности (k_p), которые представлены на рис. 2.

Установлено, что высокую пластичность имеют покрытия, полученные при температуре осаждения 400–430° С, η достигает 88 ÷ 92 %. Увеличение температуры подложки вызывает уменьшение микропластичности поверхности вдвое.

По диаграммам нагружения можно определить распределение твердости по толщине слоя, равного 1 ÷ 3 мкм, т. е. в диапазоне толщин, ответственном за сопротивление поверхностного слоя покрытия изнашиванию. Расчет производился по формуле:

$$H = C \frac{P}{h^2},$$

где H – микротвердость (10 ГПа); $C = 38,1$ для трехгранной пирамиды Берковича, которая использовалась при испытании; P – нагрузка, z, h – соответствующая глубина внедрения индентора, мкм.

Результаты представлены на рис. 3 (1 и 2 – кривые изменения микротвердости покрытия при непрерывном нагружении). Кривая 1, пересекаясь с кривыми изменения микротвердости при непрерывном нагружении, интерпретирует значения последней при $P = 50 \text{ z} (0,5 \text{ Н})$. Сравнивая эти значения с исходными $H50$, видно, что наблюдается существенное различие. Это объясняется тем, что в условиях непрерывного нагружения не реализуется упругая составляющая при вдавливании индентора.

Анализ полученных зависимостей микротвердости от нагрузки (рис. 3) показывает отсутствие положительного градиента, однако при определенной нагрузке (1,2 Н) микротвердость остается достаточно высокой (кривая 2, рис. 3). При этом поверхность ГХП обладает хорошей микропластичностью (рис. 2).

Таким образом, исследования микропластичности показали, что полученные при низких температурах химического осаждения ГХП ($t_n \approx 430^\circ \text{ C}$) обладают достаточной пластичностью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Терновский А.П. О микропластических испытаниях материалов путем вдавливания // Заводская лаборатория. 1973. № 10. С. 1242-1247.
2. Алехин В.П. К методике микромеханических испытаний материалов микровдавливанием // Заводская лаборатория. 1972. № 4. С. 488-490.
3. Айрапетян Н.А. Исследование влияния низкотемпературных процессов цианирования и нитроцементации на антифрикционные характеристики конструкционных сталей: Дис. ... канд. тех. наук. М., 1975. 204 с.
4. Томашевская И.М. Разработка и исследование кратковременных газовых процессов азотирования сталей: Дис. ... канд. тех. наук. М., 1976. 234 с.
5. Афонин В.В. Разработка технологии получения износостойких покрытий из металлоорганических соединений на сплавах алюминия: Дис. ... канд. тех. наук. М., 1981. 257 с.

