

щихся поверхностях следы задира не обнаружены. С увеличением нагрузки до 7 МПа происходит резкий рост силы трения и температуры в зоне контакта, приводящий к схватыванию и задиру поверхностей.

Упрочнение рабочей поверхности образца из сплава Д16 методом микродугового оксидирования позволяет снизить коэффициент трения в паре со сталью 18ХГТ (пара трения № 2) на 40...45 % (до 0,04...0,05). При этом нагрузочная способность пары трения повышается до 7,7 МПа. В отличие от пары трения «алюминий – сталь» (пара трения № 1) процесс трения остается стабильным вплоть до нагрузки $p = 6,3$ МПа, после которой начинаются колебания и скачки силы трения. При нагрузке $p = 7,7$ МПа из-за резкого увеличения температуры в зоне трения происходит схватывание поверхностей.

Нанесение на поверхность оксидокерамики тонких слоев антифрикционных материалов (пара трения № 3) позволяет повысить нагрузочную способность на 15...20 % по сравнению с парой

трения № 1 (до 8,3 МПа) при коэффициенте трения в сопряжении 0,03...0,05. Как и в паре трения № 2, процесс трения остается стабильным во всем диапазоне прикладываемой нагрузки. На предельной нагрузке $p = 8,3$ МПа после двух минут испытания регистрируются резкий рост температуры и вызванное этим повышение силы трения и последующее схватывание образцов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Черненко В. И., Снежко Л. А., Папанова И. И. Получение покрытий анодно-искровым электролизом. – Л.: Химия, 1991. – 128 с.
2. Баковец В. В., Поляков О. В., Долгопосова И. П. Плазменно-электролитическая анодная обработка металлов. – Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1991. – 168 с.
3. Метод дугового оксидирования / Г. А. Марков, В. И. Белеванцев, О. П. Терлеева и др. // Вестник МГТУ. Серия «Машиностроение». – 1992. – № 1. – С. 34–56.
4. Воронков Б. Д. Подшипники сухого трения. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1979. – 223 с.
5. Анцупов В. П. Теория и практика плакирования изделий гибким инструментом. – Магнитогорск, 1999. – 241 с.

УДК 620.178.153

УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТВЕРДОСТИ ПРИ МАЛЫХ И СРЕДНИХ НАГРУЗКАХ*

Асп. МИНЧЕНЯ В. В.

Институт прикладной физики НАН Беларуси

В последние годы проявляется все больший интерес к методам контроля твердости покрытий и упрочненных поверхностных слоев металлических изделий. Традиционный метод измерения микротвердости покрытий с помощью прибора ПМТ-3 позволяет надежно получать числа микротвердости HV в широком интервале нагрузок от 0,01 до 2 Н. Нижний предел измерения объясняется тем, что при малых нагрузках погрешность оператора значительна даже при условии

подбора объектива прибора по апертурному числу. Погрешность оператора нелинейно возрастает при уменьшении диагонали отпечатка и соответственно оказывается больше для твердых материалов. Результаты измерений при нагрузках менее 5 г – неудовлетворительные. Верхняя граница диапазона определяется возможностями прибора ПМТ-3.

Однако на практике при исследовании влияния механических свойств и толщины покрытия

* Работа выполнена в рамках договоров с Белорусским республиканским фондом фундаментальных исследований Т99-128 и Международным фондом INTAS (№ YSF 2001/2-107).

на результат измерения твердости требуется расширение диапазона возможных нагрузок при испытаниях методом статического индентирования до 10 Н и выше. При этом стандартный прибор Виккерса с возможностью задания нагрузок от 10 до $3 \cdot 10^4$ Н мало пригоден, так как не позволяет произвести индентирование при промежуточных нагрузках до 10 Н.

Автором разработана установка (рис. 1) для статического индентирования металлических образцов с покрытиями в интервале нагрузок от 1 до 35 Н. Установка смонтирована на плите 1. В узле индентирования применен механизм пружинного параллелограмма 26. Кронштейн 3 имеет возможность перемещения относительно стойки 4 и фиксируется посредством винта 2. На кронштейне смонтированы механизм пружинного параллелограмма и уравнивающее устройство. Головка 22 содержит сменный индентор 23, столик для грузов 11, стойку 10 с отверстием для уравнивающей пружины 9. Регулировка натяжения пружины осуществляется посредством кронштейна 8 с гайкой 5. Положение несущего элемента 6 по вертикали регулируется гайкой 7 и пружиной 27. На предметном столе 25 закреплен базирующий элемент 21, относительно которого устанавливается образец 24. Устройство нагружения смонтировано на стойке 19 и состоит из кронштейна 13 с грузом 12, закреплен-

ным регулировочными прокладками 17, 14 и винтом 16 на несущем элементе 15. Несущий элемент перемещается по вертикали посредством привода 18 механизма с зубчатой рейкой 20. Для регистрации момента соприкосновения индентора с образцом применен электроконтактный метод. Электрическая часть состоит из источника питания 28, отсчетно-командного устройства 29 со световым индикатором 30.

Перед измерением образец устанавливается на столик и базируется по элементу. Механизм пружинного параллелограмма уравнивается пружиной с помощью гайки 5. Вращением гайки 7 производится перемещение механизма пружинного параллелограмма с головкой до момента контакта индентора с образцом. Груз опускается на столик посредством нагружающего устройства на заданное время. Далее груз снимается нагружающим устройством и производится подъем индентора вращением гайки 7 в обратном направлении. Образец переносится на столик микроскопа прибора ПМТ-3 с базирующим элементом, аналогичным элементу. Производится измерение геометрических параметров отпечатка с помощью микроскопа прибора ПМТ-3 с апертурным числом объектива $A = 0,37$.

Расчет твердости по результатам измерения геометрических параметров отпечатка конусного индентора производится по формуле

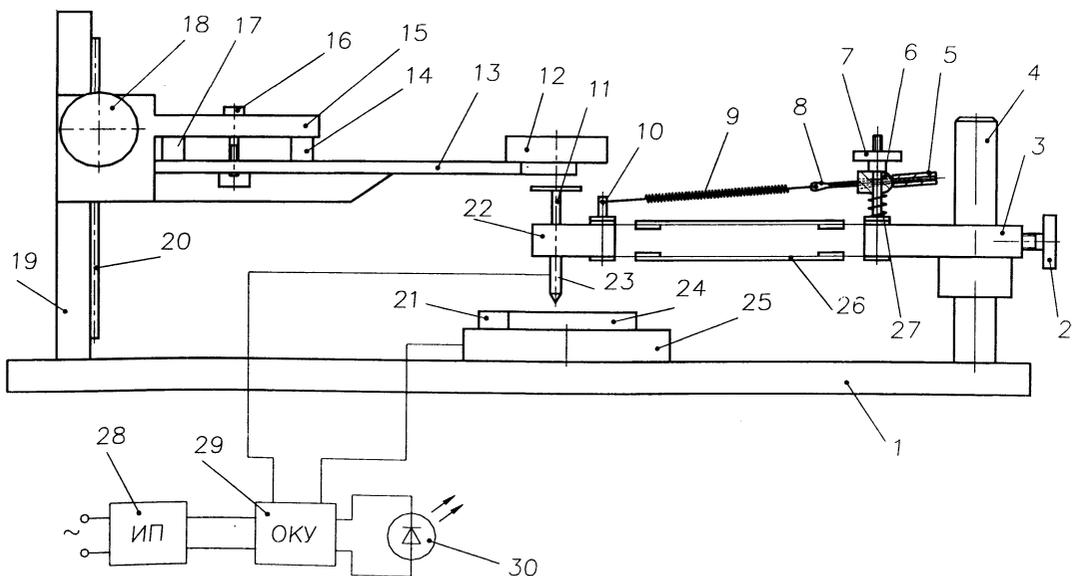


Рис. 1. Схема установки

$$H_c = \frac{4P}{\pi D^2}. \quad (1)$$

На рис. 2 представлена типовая кривая статической твердости, полученная на установке при испытаниях образца из стали 45 (ГОСТ 1055–88) с хромовым покрытием Хтв25 (общие требования по ГОСТу 9.301–86). Использован конусный индентор с углом при вершине 120 град.

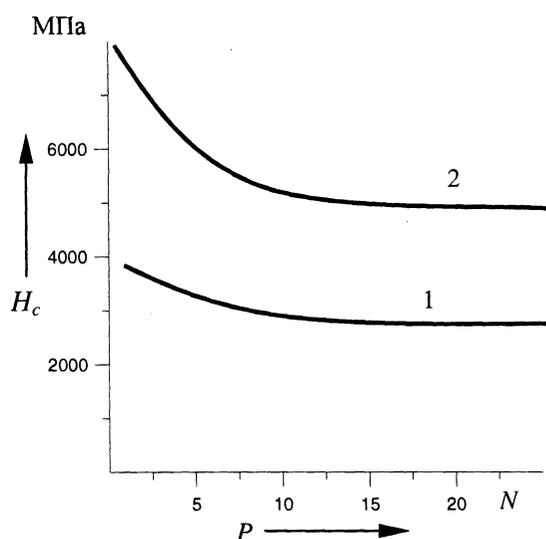


Рис. 2. Зависимость твердости H_c от нагрузки P : 1 – твердость основы; 2 – то же структуры

На рис. 2 наблюдается проявление эффекта масштабного фактора, выраженное в повышении значений измеренной твердости при малых нагрузках. Согласно известным положениям теории деформационного упрочнения, внешнее приложенное напряжение τ_a разделяется на две компоненты $\tau_a = \tau^* + \tau_i$, где τ^* – термическая компонента, эффективное напряжение сдвига, зависящее от скорости деформации и температуры; τ_i – атермическая компонента или дальнедействующие внутренние напряжения.

Поскольку твердость имеет смысл среднего удельного давления, с точностью до постоянного множителя она равна сдвиговому напряжению. Поэтому по аналогии можно записать

$$H_a = H^* + H_i. \quad (2)$$

Здесь $H_a \sim \tau_a$; $H^* \sim \tau^*$. Как известно [1], изменение микроструктуры при пластическом деформировании характеризуется двумя парамет-

рами: средней плотностью подвижных и неподвижных дислокаций. Атермическая компонента твердости ассоциируется с уже накопленными неподвижными дислокациями и другими атермическими препятствиями, которыми могут являться связанные, сидячие дислокации, стенки ячеек, границы зерен и др. Вторичные препятствия, например лес дислокаций или растворенные атомы, являются слабыми и могут быть преодолены подвижными дислокациями за счет тепловых колебаний кристаллической решетки, т. е. за счет термоактивационного процесса и эффективного напряжения сдвига, пропорционального термической компоненте твердости.

Будем рассматривать атермическую компоненту твердости при испытаниях на твердость методом статического индентирования, так как влияние кинетического параметра H^* пренебрежимо мало.

Для оценки атермической компоненты твердости можно воспользоваться выражением [2]

$$H_i = \alpha G b \sqrt{\rho_n}; \quad (3)$$

где G – модуль сдвига; b – то же вектора Бюргерса; ρ_n – плотность неподвижных дислокаций; α – постоянная, учитывающая трехосное напряженное состояние под индентором.

В уравнении (3) плотность неподвижных дислокаций или стопоров непосредственно связана со структурным параметром L , определяемым как половина среднего расстояния между наиболее сильными стопорами, следующим соотношением: $\rho_n \sim 1/L$. Понятие структурного параметра L позволяет выделить слой материала, непосредственно примыкающий к индентору, толщина которого l определяется этим параметром. По данным авторов [3, 4], процесс деформационного упрочнения максимально развит в этом слое, и именно этот очаг деформации в основном определяет значение твердости. Будем рассматривать внешнюю границу слоя, как совпадающую с поверхностью отпечатка, а внутреннюю – как ближайшее среднее расстояние от поверхности отпечатка до наиболее подвижных дефектов. При условии равномерного распределения дефектов зависимость $l = f(L)$

$$l = \frac{1}{2} L. \quad (4)$$

Рассмотрим условия равновесия для внутренней и внешней поверхностей слоя. Выраженные через твердость выражения имеют вид:

$$H_M = \frac{P}{S}; \quad (5)$$

$$H_l = \frac{P}{S_l}, \quad (6)$$

где P – нагрузка на индентор; S – площадь проекции отпечатка; H_M – твердость по Мейеру; S_l – площадь, найденная с учетом среднего значения l ; H_l – твердость с учетом размера l .

Выражение для площади S_l выглядит следующим образом:

$$S_l = (\sqrt{S} + 2l)^2. \quad (7)$$

Тогда выражение для твердости по Мейеру с учетом (5)–(7)

$$H_M = H_l \left(1 + \frac{2l}{\sqrt{F}} \right). \quad (8)$$

Выражение (8) учитывает эффект масштабного фактора с точки зрения дислокационной теории упрочнения и позволяет оценить размер l при статических измерениях твердости. При

этом за твердость по Мейеру принимается значение твердости, измеренное при больших размерах отпечатка индентора, когда проявление эффекта масштабного фактора пренебрежимо мало.

Разработана установка для измерения статической твердости методом восстановленного отпечатка в диапазоне нагрузок от 1 до 35 Н. Испытания показали, что разработанная установка имеет разрешение по нагрузке порядка 0,1 Н. Установка позволяет регистрировать ход кривых статического индентирования при исследованиях физико-механических свойств металлических структур с покрытиями.

Рассмотрен метод учета эффекта масштабного фактора при статических измерениях твердости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Klepachko J. R. The newest development on physically based constitutive modeling in dynamic plasticity // Proceedings of the Sixth International Conference Mechanical Behaviour of Materials-VI. – Kyoto, Japan, 1991. – С. 235–244.
2. Шоршоров М. Х., Алехин В. П., Булычев С. И. О масштабной зависимости твердости // Физика металлов и металловедение. – 1977. – Т. 3, вып. 2. – С. 374–379.
3. Предводителев А. А., Рожанский В. Н., Степанов В. М. Процессы деформирования материалов в микрообъемах // Кристаллография. – 1962. – № 7. – С. 418.
4. Алехин В. П., Терновский А. П. Структурные и кинетические особенности формирования материалов при микровдавливании // Новое в испытаниях на микротвердость. – М., 1974. – С. 29.

УДК 621.793

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭМИССИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В ПЛАЗМЕ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА И ИХ АДАПТАЦИЯ К МАГНЕТРОННЫМ РАСПЫЛИТЕЛЬНЫМ СИСТЕМАМ

Асп. ФИГУРИН К. Б., канд. техн. наук ФИГУРИН Б. А.

Белорусский национальный технический университет

Магнетронный распылитель является высокоэнергетическим устройством, преобразующим энергию магнитного поля и локализованного тлеющего разряда в энергию распыленных ато-

мов материала катода. Плазма локализованного тлеющего разряда обладает наибольшей тепловой энергией и является источником лучистого нагрева при обработке подложек и покрытий.