

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ УСЛОВИЙ ДИНАМИЧЕСКОГО ИНДЕНТИРОВАНИЯ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО (001) ВОЛЬФРАМА И ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ МЕДИ

Ю.В. Мильман, К.Э. Гринкевич, Л.В. Мордель

*Институт проблем материаловедения им. И.М. Францевича НАН Украины,
Киев, Украина*

E-mail: kevich@ipms.kiev.ua, тел +38(044)424-24-29

Изложена методика индентирования при нагружении индентора статической и модулированной по величине нагрузками. Определены значения для C_u и W статической и динамической твердости, а также характеристики пластичности. Показано, что при приложении модулированной нагрузки твердость материалов снижается, а характеристика пластичности – возрастает. Предложенная методика может быть использована для изучения механического поведения и аттестации материалов и деталей, работающих в условиях вибрации и переменных нагрузок.

ВВЕДЕНИЕ

Испытания методом индентирования как способом неразрушающего контроля охватывают в настоящее время области макро-, микро- и наноиндентирования. Они становятся эффективным инструментом в решении многообразных проблем пластической деформации и разрушения, прогноза надежности и ресурса изделий машиностроения, работающих в условиях износа, усталости, динамических и ударных нагрузок. Если раньше с помощью индентирования можно было судить в основном о таких характеристиках, как твердость и предел текучести, то в настоящее время возможно и определение характеристики пластичности, которая введена в работе [1] как безразмерный параметр δ_H :

$$\delta_H = \frac{\varepsilon_p}{\varepsilon} = 1 - \frac{\varepsilon_e}{\varepsilon}, \quad (1)$$

где ε_p , ε_e и ε – усредненные (по площади контакта индентора с образцом) значения соответственно пластической, упругой и общей деформаций в направлении приложения нагрузки.

Методы индентирования можно разделить на два типа в зависимости от вида нагружения индентора: при статической нагрузке твердость по Бринеллю, Роквеллу, Виккерсу и др. и при динамической (ударной) нагрузке твердость по Шору, Польди и др.

Наиболее распространенным стал метод измерения твердости по Бринеллю (НВ). Значительным преимуществом метода измерения твердости по Бринеллю [2] является то, что, зная твердость по НВ, можно оценить прочностные характеристики. К сожалению, при использовании этого метода не сохраняется закон подобия отпечатков при изменении нагрузки на индентор.

Широко востребован наиболее универсальный и наименее трудоемкий метод измерения твердости по Роквеллу [3]. В этом методе отпечатки от конуса или шарика очень малы, поэтому метод можно отнести к неразрушающим методам контроля качества изделия. Однако результаты измерения твердости по Роквеллу сложно сопоставить со стандартными механическими свойствами.

Преимущество метода Виккерса [4] заключается в том, что с его помощью можно измерять твердость очень многих материалов (от мягких до высокотвердых), а также микротвердость и даже нанотвердость образцов. В физическом плане метод Виккерса имеет преимущество перед методом Бринелля, так как в этом методе сохраняется подобие отпечатков при изменении нагрузки, подаваемой на индентор. Однако алмазный индентор, применяемый в методе Виккерса, значительно дороже шарика из твердого сплава, используемого в приборе Бринелля.

В отличие от статической твердости ударная твердость определяется нанесением отпечатка шариком при ударной нагрузке [5] или отскоком от испытываемого материала свободно падающего бойка или маятника с бойком [6].

В литературе известен ряд зависимостей для определения механических свойств при ударной твердости [7-9]. Авторами работы [10] была исследована зависимость между статической и ударной твердостью. Вместе с тем, определение механических свойств по ударной твердости недостаточно разработано в сравнении со статической твердостью, и при использовании этого метода наблюдается большой разброс экспериментальных данных. В частности, при определении твердости по методике Польди (НР) получают приближенные результаты, так как твердость эталона определяется при статическом вдавливании по методу Бринелля, а твердость исследуемого образца НР – при динамическом вдавливании. Для одного и того же материала динамическая твердость значительно больше статической, что отражает рост предела текучести при увеличении скорости деформации. Для различных материалов отношение этих твердостей колеблется в пределах от 1,6 до 2,8. Но в работах А.В. Рабцевича [11] и В. Васаускаса [12] было показано, что в равных условиях при знакопеременном характере действующих сил твердость значительно ниже, чем при статическом характере нагружения. Анализ литературных

данных позволяет сделать заключение о том, что напряженно-деформированное состояние поверхностных слоев материалов может значительно меняться при переходе от постоянной к переменной контактной нагрузке, а следовательно, должно меняться и значение твердости. В настоящей работе обсуждается разработанная авторами методика индентирования при одновременном действии статической и модулированной по величине нагрузки на индентор. Приведены результаты измерения твердости и характеристики пластичности для Cu и W при различном сочетании статической и модулированной нагрузок. В дальнейшем для краткости такую твердость будем называть динамической.

МАТЕРИАЛЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

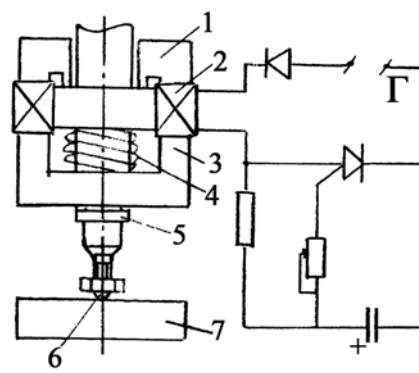
В роли материала для исследований были выбраны (001) монокристалл вольфрама (ОЦК-решетка) и поликристаллическая медь (ГЦК-решетка). В этих материалах процесс деформации не сопровождается фазовыми превращениями, поэтому их можно рассматривать как модельные образцы для изучения динамической твердости материалов.

При исследовании образцов методом индентирования при совместном действии статической и модулированной нагрузок был использован сферический индентор из силинита с радиусом 3 мм, а также индентор Роквелла (алмазный конус с углом при вершине $2\gamma = 120^\circ$) для сопоставления.

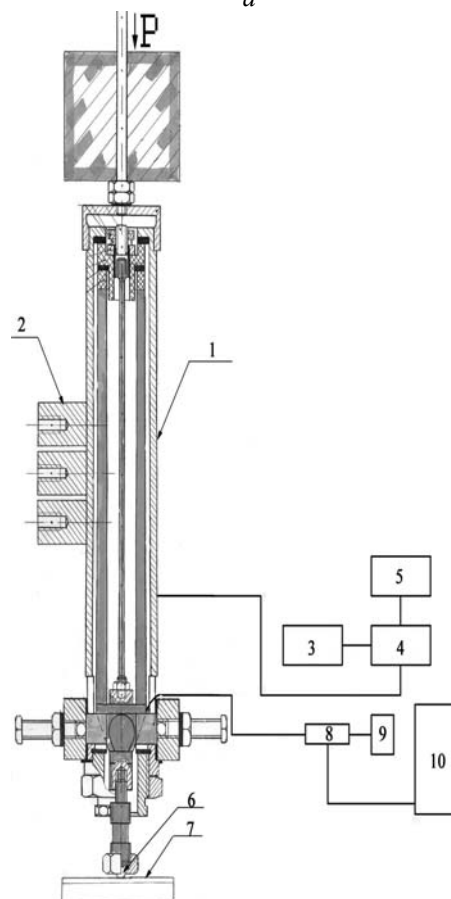
МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Определение динамической твердости проводили на разработанной авторами установке АТКД [13], включающей вибродинамическое устройство и пьезокерамический вибростенд.

Вибродинамическое устройство (рис. 1,а) состоит: из неподвижной части 1, катушки 2 и подвижной части 3 электромагнита, пружины 4, стопорного кольца 5 и генератора электрических импульсов Г. Электрический сигнал с генератора преобразуется электромагнитом в механические колебания, которые с помощью подвижной части передаются в зону контакта индентора 6 и образца 7. В вибростенде (см. рис. 1,б) электрический сигнал с генератора преобразуется пьезорезонатором в механические колебания, которые также передаются в зону контакта индентора и плоского образца. Вибростенд пьезокерамический состоит из следующих основных узлов и блоков (см. рис. 1,б): 1 – пьезорезонатора (основа пьезорезонатора – механический вибратор из поликристаллического пьезоэлектрического материала); 2 – блока вертикального перемещения пьезорезонатора; 3 – генератора синусоидальных колебаний «1027» фирмы «Брюль и Кьер»; 4 – усилителя мощности; 5 – блока питания усилителя мощности (трехфазного); 6 – индентора; 7 – образца; 8 – преусилителя сигналов вибродатчиков типа «2635» фирмы «Брюль и Кьер»; 9 – блока питания; 10 – осциллографа электронно-лучевого «С1-99».



а



б

Рис. 1. Принципиальная схема модулей установки для испытаний на твердость в условиях динамического нагружения для частот: 1...25 Гц (а) и 5...20000 Гц (б)

Динамическую модулированную составляющую силы нормального давления ΔP для АТКД задавали в виде механических колебаний, которые прилагаются одновременно со статической силой P_0 ; величина амплитуды A модулированной составляющей нагрузки ΔP составляет 0...30 % от статической нагрузки и определяется по формуле:

$$\Delta P = \frac{A}{2} \left(1 - \sin \frac{2\pi t}{T} \right), \quad (2)$$

где A – амплитуда нагрузки; T – период; t – время. Как следует из формулы (2), модулированная нагрузка изменяется от 0 до A .

Конструктивные особенности установки приняты такими, чтобы для общей нагрузки

удовлетворялось условие $P = P_0 - \Delta P$ для вибродинамического устройства и $P = P_0 + \Delta P$ для пьезорезонатора.

Таким образом, в случае вибродинамического устройства модулированная нагрузка уменьшает, а в случае пьезорезонатора – увеличивает общую нагрузку в нашем эксперименте.

Соответственно в отсутствие модуляции нормальной нагрузки ($\Delta P=0$) общая нагрузка равна статической $P = P_0$.

Значения твердости при использовании сферического индентора рассчитывали по величине диаметра отпечатка при соответствующей нагрузке на индентор P_0 . Значения диаметров отпечатков образцов измеряли оптическими методами [14] и с помощью профилографа–профилометра модели К-201 завода «Калибр».

По величине диаметра отпечатка рассчитывали значения для твердостей: статической (H_{St}) и динамической (H_{dm}). Использовали формулу Бринелля для сферического цилиндрического индентора:

$$H = \frac{2P_0}{\pi D \left(D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)}, \quad (3)$$

где D – диаметр сферического индентора, а d – диаметр отпечатка.

Упругую деформацию рассчитывали по формуле из работы [1]:

$$\varepsilon_e = \frac{HM}{E} \left(1 - \nu - 2\nu^2 \right), \quad (4)$$

где HM – твердость по Мейеру.

Общая деформация определялась по формуле

$$\varepsilon_t = \int \frac{F dS}{S} = \ln \frac{F}{S}, \quad (5)$$

где S – площадь проекции отпечатка твердости на поверхности образца; F – площадь поверхности отпечатка, при этом F и S определяли как

$$F = \pi Dh = \frac{1}{2} \pi D \left(D - \sqrt{D^2 - d^2} \right) \text{ и } S = \frac{\pi d^2}{4}. \quad (6)$$

Пластическую деформацию находили по формуле $\varepsilon_p = \varepsilon_t - \varepsilon_e$, характеристику пластичности по – (1).

Для алмазного конуса определяли твердость по Мейеру:

$$HM = \frac{P_0}{S}. \quad (7)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБСУЖДЕНИЯ

При изменении глубины погружения сферического индентора, как уже отмечалось, не выполняется закон подобия отпечатков, и угол вдавливания не является постоянным, т.е. меняется степень деформации в лунке. Полученные

профилограммы отпечатков твердости исследованных образцов вольфрама и меди иллюстрируют также отклонения от сферической формы при статическом и динамическом нагружении вследствие образования навалов.

Вытесненный объем материала согласно В.К. Григоровичу [15] должен располагаться над первоначальной плоскостью и тем или иным образом ее искажать. Характер этого искажения определяется способностью материала к пластическому деформированию и деформационному упрочнению. В случае высокой пластичности, когда деформационное упрочнение низкое, образующийся вокруг отпечатка твердости навал может быть высоким, достигая значения $0,1 \dots 0,15$ от глубины отпечатка. При большом деформационном упрочнении навалы более низкие, но распространяются на большие расстояния от отпечатка твердости. Существенно, что навалы имеют наибольшую высоту в определенных кристаллических направлениях легкого скольжения [16]. Если деформация охватывает большую поверхность образца при высоком деформационном упрочнении, то навал выглядит плоским, и его вершина удалена от отпечатка. Если же пластическая деформация определяется сравнительно небольшим объемом, то высота навала больше, и он находится в непосредственной близости от краев отпечатка. Это подтверждает выполненное профилографирование полученных отпечатков.

Экспериментальные значения статической и динамической твердостей, а также значения характеристики пластичности δ_H приведены на рис. 2, 3.

При измерении статической твердости сферическим индентором увеличение нагрузки P_0 на индентор приводит к сложной зависимости $H_{St}(P)$. С одной стороны, масштабный фактор, как известно [15-18], приводит к снижению твердости при увеличении P_0 , но одновременно увеличение P_0 приводит к увеличению степени деформации под индентором, что вызывает повышение H_{St} . В результате в нашем эксперименте H_{St} слабо зависит от P_0 (см. рис. 2), хотя некоторое ее снижение при увеличении P_0 все же наблюдается. Однако при измерении динамической твердости (при постоянном значении $A = 10$ Н) увеличение статической нагрузки P_0 приводит к росту твердости (см. рис. 2). При этом рост твердости наблюдается как при использовании сферического индентора, так и при применении алмазного конуса Роквелла.

Приведенные на (см. рис. 3,а) значения твердости и характеристики пластичности δ_H свидетельствуют о том, что увеличение амплитуды динамической нагрузки A (при постоянной нагрузке P_0) или нагрузки P_0 (при постоянной амплитуде A) приводит к заметному снижению твердости и росту характеристики пластичности δ_H (см. рис. 3,б).

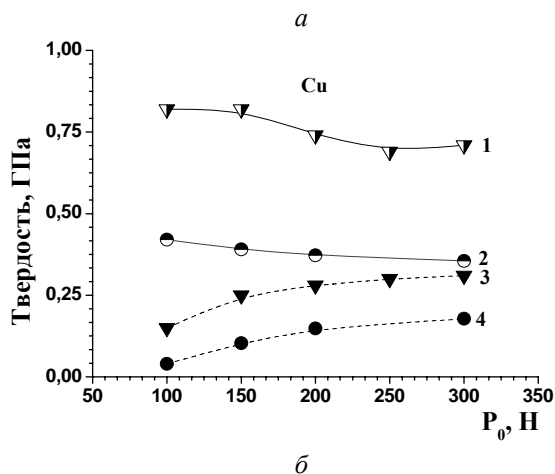
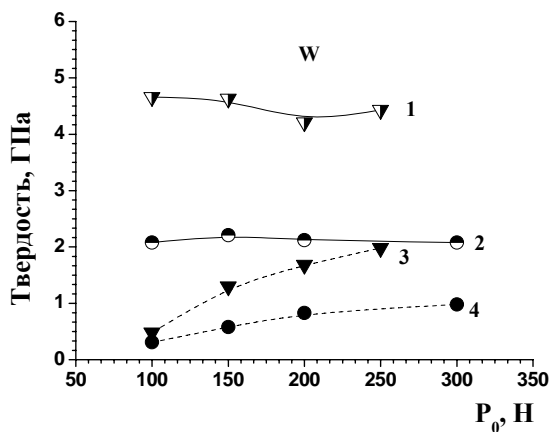


Рис. 2. Зависимости статической H_s и динамической H_d твердостей от нагрузки и типа индентора: 1, 2 – статическая твердость; 3, 4 – динамическая твердость, $A=10$ Н; 1, 3 – алмазный конус с углом заточки 120° ; 2, 4 – сферический индентор из силинита диаметром 6 мм

Характеристика пластичности δ_H как для пластичной меди, так и для малопластичного вольфрама в условиях динамического нагружения существенно выше, чем в условиях статического нагружения во всем исследованном диапазоне нагрузок (при статическом нагружении $\delta_H = 0,98$ для Cu и близка к нулю для W при всех нагрузках).

Анализ данных на рис. 2-3 позволяет сделать заключение, что для исследуемых материалов наблюдаются отличия в процессах формоизменения отпечатка при статической и динамической нагрузках, а зависимость динамической твердости от нагрузки имеет принципиальные отличия от традиционной твердости. Так, уменьшение динамической твердости пропорционально росту амплитуды (кинетической энергии колебательной системы) и обратно пропорционально увеличению нагрузки.

ВЫВОДЫ

Показано, что для исследованных металлов Cu и W, вне зависимости от типа индентора, с увеличением постоянной нагрузки P_0 динамическая твердость (твердость, получаемая при одновременном действии статической и модулированной по величине нагрузок на

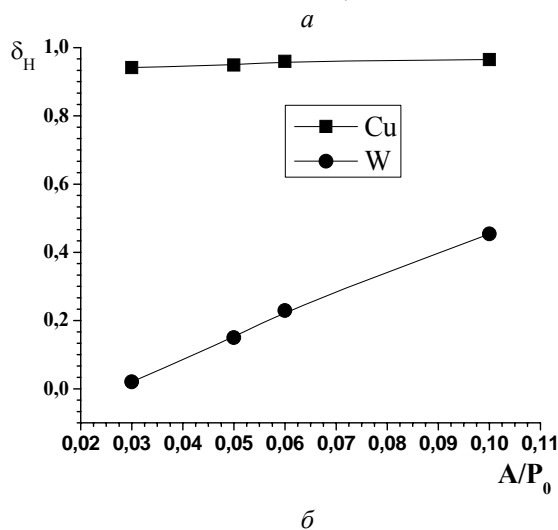
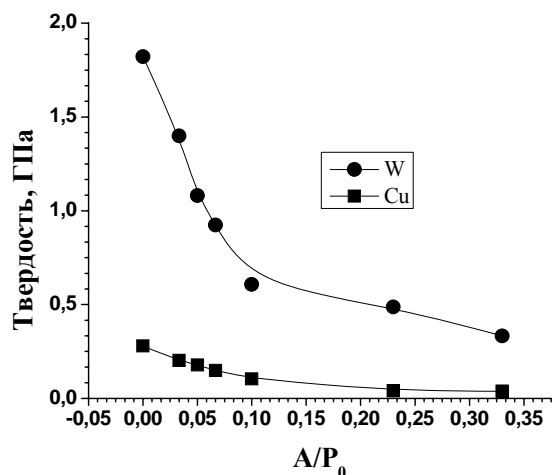


Рис. 3. Зависимости для меди и вольфрама: а – динамической твердости и б – характеристики пластичности δ_H от соотношения A/P_0

индентор) увеличивается (а не снижается, как в случае статической твердости). Динамическая твердость при $A/P_0 = 0,03 \dots 0,3$ в 2-3 раза меньше, чем статическая твердость.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что увеличение амплитуды динамической нагрузки A (при постоянной нагрузке P_0) или нагрузки P_0 (при постоянной амплитуде A) приводит к заметному снижению твердости и росту характеристики пластичности δ_H . Во всем исследованном диапазоне нагрузок (50...300 Н) для пластичной меди и малопластичного вольфрама характеристика пластичности δ_H выше при динамическом нагружении, чем при статическом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Yu.V. Milman, B.A. Galanov, S.I. Chugunova. Plasticity characteristic obtained through hardness measurement (overview N 107) // *Acta Met. and Mater.* 1999, v.41, N 9, p. 2523–2532.
2. ГОСТ 8.062-85. Метод измерения твердости по Бринеллю.
3. ГОСТ 9013-059. Метод измерения твердости по Роквеллу.
4. ГОСТ 2999-75. Метод измерения твердости по Виккерсу.

5. ГОСТ 24621-91. *Метод измерения твердости Пальди.*
6. ГОСТ 23273-78. *Метод измерения твердости по Шору.*
7. Ю.А. Букин, М.С. Дрозд, Р.Н. Алексеева и др. Определение твердости и механических свойств металла энергетического оборудования безобразцовым методом // *Энергетическое строительство.* 1976, №3, с. 35–36.
8. Н.Н. Давиденков. *Динамические испытания металлов.* Л.: Лениздат, 1936, с. 394.
9. М.С. Дрозд. *Определение механических свойств металлов без разрушения.* М.: «Металлургия», 1965, с. 170.
10. Н.Н. Давиденков. *Некоторые проблемы механики материалов.* Л.: «Лениздат», 1943, с. 86-108.
11. А.В. Рабцевич. Измерение модуля упругости металла методом динамического индентирования // *Весці НАН Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук.* 1999, №3, с. 118–122.
12. Vytautas Vasauskas, Vytautas Capas. Energy concept in comparison of static and dynamic hardness // *«HARDMEKO 2004 Processing Hardness Measurements Theory and Application in Laboratories and Industries», 11-12 November, 2004, Washington, D.C., USA,* p.152–158.
13. Ю.В. Мильман, К.Э. Гринкевич, С.И. Чугунова, З.П. Шурыгина, Б.В. Шурыгин, И.В. Ткаченко, В.Х. Мельник. Определение механических свойств материалов методом индентирования при динамическом (циклическом) нагружении // *Проблемы ресурса и безопасности эксплуатации конструкций, сооружений и машин.* 2009, с. 33 – 37.
14. С.Р. Игнатович, И.М. Закиев, В.И. Закиев. Контроль качества поверхностей деталей с использованием бесконтактного профилографа // *Авиационно-космическая техника и технология (34).* Харьков: ХАИ, 2006, № 8, с. 20-22.
15. В.К. Григорович. *Твердость и микротвердость металлов.* М.: «Наука», 1976, с. 230.
16. N.A. Stelmashenko, M.G. Walls, L.M. Brown, and Yu.V. Milman. Microindentations on W and Mo oriented single crystals: an STM study // *Acta metall. mater.* 1993, v. 41, N 10, p. 2855-2865.
17. М.П. Марковец. *Определение механических свойств материалов по твердости.* М.: «Машиностроение», 1979, с. 190.
18. С.А. Фирстов, В.Ф. Горбань, Э.П. Печковский. *Новая методика обработки анализа результатов автоматического индентирования материалов.* Киев: «Логос», 2009, с. 82.

Статья поступила в редакцию 03.06.2011 г.

ВИВЧЕННЯ ВПЛИВУ УМОВ ДИНАМІЧНОГО ІНДЕНТУВАННЯ НА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ МОНОКРИСТАЛІЧНОГО (001) ВОЛЬФРАМУ І ПОЛІКРИСТАЛІЧНОЇ МІДІ

Ю.В. Мільман, К.Е. Грінкевич, Л.В. Мордель

Викладена методика індентування за умов навантаження індентора статичним і модульованим за величиною навантаженнями. Визначені значення для Cu і W статичної і динамічної твердості, а також характеристики пластичності. Показано, що за умов прикладання модульованого навантаження твердість матеріалів знижується, а характеристика пластичності – зростає. Запропонована методика може бути використана для вивчення механічної поведінки та атестації матеріалів і деталей, які працюють в умовах вібрації і змінних навантажень.

THE STUDY OF THE INFLUENCE OF THE CONDITIONS OF DYNAMIC INDENTATION ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF SINGLE-CRYSTAL (001) POLYCRYSTALLINE TUNGSTEN AND COPPER

Yu.V. Milman, K.E. Grinkevych, L.V. Mordel

The indentation technique by static and modulated loading modes on the indenter is described. For Cu and W the characteristics of hardness and plasticity at static and dynamic mode were determined. For these metals it is shown that the modulated loading mode leads to decrease of hardness and increase of the plasticity characteristic. The proposed technique can be used to study the mechanical behavior and evaluation of materials and parts operating under vibration conditions and alternate loading.