

Gregory S. Tymchyk, Volodymyr I. Skytsiuk, Tatiana R. Klotchko, Andrzej Kotyra, Azat Turgunbekov, Saule Smailova // Przegląd Elektrotechniczny, R. 95, NR 4/2019.

4. Крагельский, И.В. Трение, изнашивание и смазка: Справочник. В 2-х кн. Кн. 1. / И.В. Крагельский, В.В. Алисица. – М.: Машиностроение, 1978. – 400 с.

5. Армарего, И. Дж. А. Обработка металлов резанием / И. Дж. А. Армарего, Р.Х. Браун. – М.: Машиностроение, 1977. – 325 с.

6. Булик, М.О. Автоматизированный модуль контролю твердості матеріалу штучних імплантів / В.І. Скицюк, Т.Р. Ключко / Збірн. статей. XI науково-практ. конфер. студентів та аспірантів «Погляд у майбутнє», 15-16 травня 2018 р., м. Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського. – 2018. – С. 329-332.

7. Патент Украины 128709 МПК (2017.01) GOIN 3/40. Спосіб вимірювання мікротвердості деталі / В.І. Скицюк, Т.Р. Ключко, М.О. Булик, М.М. Печонка. – Опубл. 10.10.2018. Бюл. № 19.

УДК 620.178

## ОЦЕНКА ВЗАИМОВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ УДАРНОГО ВДАВЛИВАНИЯ СФЕРИЧЕСКОГО ИНДЕНТОРА, СКОРОСТИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ И ТВЕРДОСТИ МЕТАЛЛА

Ланцман Г.А., Рудницкий В.А., Крень А.П.

Государственное научное учреждение «Институт прикладной физики НАН Беларуси»  
Минск, Республика Беларусь

Известно, что механические характеристики металлов, измеренные при динамическом нагружении, как правило, имеют более высокие значения, чем эти же характеристики, определенные при плавном приложении нагрузки. Считается, что основным параметром, который влияет на это увеличение, является скорость пластической деформации  $\dot{\epsilon}$ . Особым случаем нагружения является удар. При ударном индентировании процесс деформирования не является в полной мере контролируемым со стороны исследователя, а  $\dot{\epsilon}$  является сложной характеристикой, зависящей как от условий испытаний, так и от свойств контролируемого материала.

Для определения скорости пластической деформации в настоящее время применяются различные выражения [1–3]. Так, в работе [1] предлагается использовать с этой целью отношение скорости перемещения индентора  $V$ , которая в процессе испытания поддерживается постоянной, к величине параметра индентирования  $\gamma$ :

$$\dot{\epsilon} = \frac{V}{\gamma} \quad (1)$$

В качестве  $\gamma$  может использоваться как диаметр пластического отпечатка  $d_c$ , так и контактная глубина вдавливания  $h_c$ , образующиеся при внедрении в металл индентора диаметром  $D$  и массой  $m$  с предударной скоростью  $V_0$  (рис.1). Влияние  $d_c$  и  $h_c$ , оказываемое на  $\dot{\epsilon}$ , примерно одного порядка, и порядок значений  $\dot{\epsilon}$  тоже примерно сохраняется. При этом  $d_c$  можно считать мерой сдвиговой (радиальной), а  $h_c$  – нормальной составляющей пластической деформации. Применительно к ударному нагружению  $\dot{\epsilon}$  может рассчитываться как усредненная за весь удар, так и мгновенная, изменяющаяся в процессе нагружения. Рассмотрим влияние параметров индентирования ( $D$ ,  $m$ ,  $V_0$ ) и характеристик материала (динамической твердости  $H_d$ ) на значение средней скорости пластической деформации  $\bar{\dot{\epsilon}}$ .

Не смотря на то, что в процессе удара скорость вдавливания  $V(t)$  меняется, будем рассматривать  $V = V_0$ . Для определения  $\bar{\dot{\epsilon}}$ , для случая  $\gamma = d_c$ , найдем  $d_c$  из уравнения для динамической твердости [4]:

$$H_d = \frac{W_0 \cdot 32 D}{\pi d_c^4}, \quad (2)$$

где  $W_0 = \frac{mV_0^2}{2}$  – предударная энергия,  $\frac{\pi d_c^4}{32D}$  – объем пластического отпечатка.

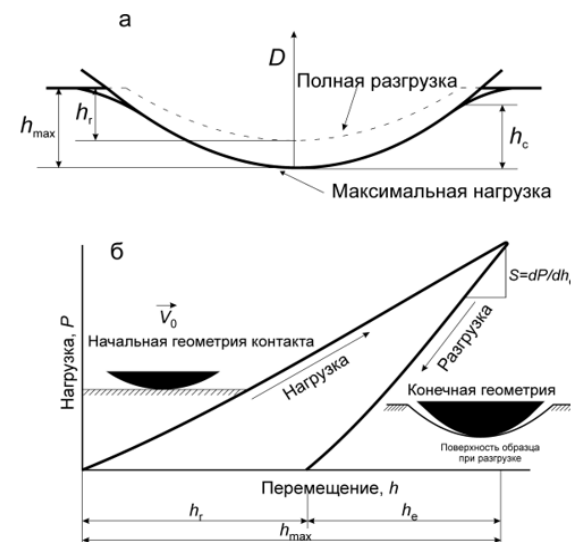


Рисунок 1 – Процесс динамического взаимодействия индентора и испытуемого материала:  
а – схема контакта, б – диаграмма нагружения

Определим  $d_c$  из (2) и подставив в (1), получим выражение для скорости радиальной составляющей пластической деформации:

$$\bar{\dot{\epsilon}}_r = 0,66 \cdot \left( \frac{V_0^2 H_d}{mD} \right)^{1/4}. \quad (3)$$

Для случая  $\gamma = h_c$  используем геометрическое соотношение между диаметром и глубиной пластического отпечатка, характерное для условия  $d_c \ll D$ :

$$d_c = 2(h_c D)^{1/2} \quad (4)$$

Решая (1), (2) и (4) совместно получим формулу для величины скорости нормальной составляющей пластической деформации

$$\bar{\varepsilon}_n = 1,77 \cdot \left(\frac{H_d D}{m}\right)^{1/2} \quad (5)$$

С помощью уравнений (3) и (5) можно оценить влияние предударной скорости, диаметра сферы и массы индентора, а также динамической твердости материала на скорость пластической деформации. При этом следует понимать, что величина  $H_d$  не является постоянной и изменяется при варьировании  $D$  и  $W_0$ . Анализ формулы (3) показывает, что на величину  $\bar{\varepsilon}_r$ , при прочих равных условиях, в большей степени влияние оказывает  $V_0$ , а  $H_d$ ,  $m$  и  $D$  в меньшей. Здесь также следует учитывать, что с увеличением  $V_0$  динамическая твердость будет увеличиваться. Например, для  $\bar{\varepsilon}_n$  (формула (5))  $V_0$  не входит в выражение напрямую, однако опосредованно оказывает влияние, поскольку  $H_d$  будет зависеть от  $V_0$ . Диаметр  $D$  разнонаправленно влияет на  $\bar{\varepsilon}_r$  и  $\bar{\varepsilon}_n$ . Проведенный анализ подтверждает сложность описания удара, как синергетического процесса. При ударе невозможно изменить какой-либо параметр, не повлияв на значения других. Необходимо учитывать и тот факт, что при ударе деформация проходит разные стадии: от упругой до полностью пластической, и от их вклада отклик материала на приложенное воздействие будет значительно отличаться. Если использовать выражения (1) и (4), то можно также получить соотношение, связывающее величины скорости пластической деформации:  $\frac{\bar{\varepsilon}_r}{\bar{\varepsilon}_n} = \frac{d_c}{4D}$ .

Кроме формулы (1) в практике индентирования используется еще одно выражение для деформации, полученное Тэйбором [4]:

$$\varepsilon = \frac{0,2 d_c}{D} \quad (6)$$

Считается, что  $\varepsilon$ , выраженная этой формулой, соответствует истинной деформации при одноосном растяжении. Если разделить это выражение на длительность активного этапа удара  $t_a$  – время, в течение которого деформация увеличивается, получим другое выражение для средней скорости пластической деформации:

$$\bar{\varepsilon}_t = \frac{0,2 d_c}{t_a D} \quad (7)$$

Для оценки степени влияния, входящих в формулы (3), (5) и (7) величин на получаемое значение  $\bar{\varepsilon}$ , и подтверждения пригодности их использования были проведены соответствующие эксперименты.

Решая совместно (2) и (7) можно получить:

$$\bar{\varepsilon}_t = 0,4 \left(\frac{m V_0^2}{\pi H_d D^3 t_a^4}\right)^{1/4} \quad (8)$$

Из данного выражения следует, что при фиксированных параметрах индентирования:  $m$ ,  $V$ ,  $D$  при увеличении твердости материала  $H_d$  значение  $\bar{\varepsilon}_t$  будет снижаться. Однако это утверждение опровергается многочисленными исследованиями, в том числе полученными и в рамках данного исследования (рис. 2) (время  $t_a$  уменьшается с увеличением  $H_d$ ). При этом влияние  $t_a$  в формуле (8) более значительно, поэтому с увеличением  $H_d$  наблюдается рост  $\bar{\varepsilon}_t$ . На рис. 2 показана связь  $H_d$  и  $\bar{\varepsilon}_t$  для различных материалов, включая закаленную сталь и пластичный свинец. Предударная скорость индентора при проведении испытаний составляла  $V_0 = 0,88$  м/с, индентор имел диаметр  $D = 2,3$  мм и массу  $m = 4,3$  г.

Полученные данные убедительно подтверждают тот факт, что при ударе все параметры являются взаимозависимыми. Также следует понимать, что в процессе ударного взаимодействия скорость пластической деформации не является постоянной величиной. Мгновенная скорость деформации, в отличие от средней, снижается к концу активного этапа удара. Если определить мгновенную скорость деформации путем дифференцирования, то можно получить:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d(0,2 \frac{d_c}{D})}{dt} = \frac{0,2 d(d_c)}{D} \frac{dh}{dh} \frac{dh}{dt} = \frac{0,2 d(2\sqrt{D h_c})}{D} \frac{dh}{dh} \frac{dh}{dt} = 0,4 \cdot \frac{V}{d_c} \quad (9)$$

Уравнение (9) совпадает с формулой (1) при  $\gamma = d_c$  за исключением постоянного коэффициента 0,4, который характеризует скорость истинной деформации при испытании на растяжение.

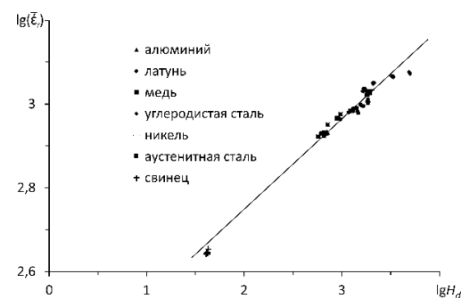


Рисунок 2 – Зависимость  $lg \bar{\varepsilon}_t$  от  $lg H_d$

Таким образом в работе изучено влияние динамичности нагружения на поведение металлов при индентировании, установлены взаимосвязи между параметрами ударного индентирования и твердостью материала, позволяющие установить степень их взаимного влияния на процесс деформирования сферическим индентором.

### Литература

1. Amin H. Almasri, George Z. Voyiadjis. Effect of Strain Rate on the Dynamic Hardness in Metals // Journal of

Engineering Materials and Technology. 2007, V. 129, P. 505-512. DOI: 10.1115/1.2744430.

2. M.A.G. Calle, L.M. Mazzariol, M. Alves. Strain rate sensitivity assessment of metallic materials by mechanical indentation tests // Materials Science & Engineering A. DOI: org/10.1016/j.msea.2018.04.023.

3. Jun Lu, Subra Suresh, Guruswami Ravichandran. Dynamic indentation for determining the strain rate sensitivity of metals // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. 2003, V. 51, P. 1923–1938.

4. Tabor D. The Hardness of Metals. Oxford University Press, 2000. 175 p.

УДК 621.317.799:621.382

## ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС НА ОСНОВЕ МАТРИЧНОГО КОММУТАТОРА

Лисенков Б.Н., Грицев Н.В.

ОПО «МНИПИ»

Минск, Республика Беларусь

В работе представлен автоматизированный измерительный комплекс для контроля параметров тестовых структур при испытаниях изделий микроэлектроники на радиационную стойкость, представленный на рисунке 1.

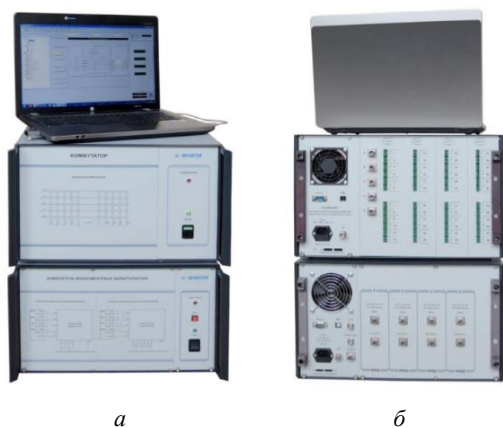


Рисунок 1 – Автоматизированный измерительный комплекс для контроля тестовых структур в составе измерителя ВАХ, матричного коммутатора и внешнего ПК:

а – вид со стороны передней панели;  
б – вид со стороны задней панели

Обмен информацией измерителя ВАХ и матричного коммутатора с ПК осуществляется по интерфейсу USB. Для обмена информацией с ПК через интерфейс RS 485 в процессе радиационного эксперимента используются преобразователи UPORT 1130 и кабели длиной 20 м из комплекта принадлежностей комплекса.

Комплекс разработан для центра коллективного пользования «Радиационный центр» при ГНПО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению» в рамках подпрограммы «Уникальное научное оборудование» ГНТП «Эталоны и научные приборы».

Комплекс состоит из: четырехканального измерителя вольтамперных характеристик (ВАХ), матричного коммутатора (5×48) и специализированного программного обеспечения (ПО) COMPLEX для внешнего персонального компьютера (ПК), которое работает под операционной системой не ниже Windows XP [1].

Работа с ПО COMPLEX не требует знаний в области программирования при проведении измерений и при подготовке программ автоматизированного контроля.

В состав комплекса также входят два устройства присоединительных (УП) для подключения тестовых структур к портам коммутатора. Первое предназначено для работы в лабораторных условиях, а второе (УП1) – для работы в удаленной испытательной камере в условиях радиационного эксперимента.

Измеритель ВАХ разработан на базе отечественного четырехканального измерителя ИППП-1/6. По сравнению с ИППП-1/6, чувствительность измерителя ВАХ по току повышена до 10 фА (в 10 раз). Также повышена его устойчивость при работе на емкостную нагрузку и на длинный кабель (для учета емкости цепей коммутатора).

Для сокращения общей длины триаксиальных кабелей в составе комплекса, входные и выходные разъемы измерителя перенесены на заднюю панель, как видно из рисунка 1, б.

На передней панели измерителя изображены схемы его подключения к матричному коммутатору, одна из которых предназначена для однопроводных, а другая для двухпроводных измерений, как показано на рисунке 1, а. Возможность использования любой из этих схем в режиме автоматизации предусмотрена в ПО COMPLEX.

Остальные параметры измерителя ВАХ соответствуют параметрам ИППП-1/6.

Поскольку в странах СНГ отсутствует опыт по разработке и производству матричных коммутаторов, основное внимание при создании комплекса было уделено вопросам построения коммутатора, вопросам задания конфигурации его узлов, вопросам контроля работоспособности большого количества герконов в составе коммутатора, вопросам метрологического обеспечения и автоматизации проверки параметров узлов матрицы коммутации (5×48= 240).

Коммутатор содержит четыре модуля коммутации (5×12), в каждом из которых имеется (5×12 = 60) сдвоенных герконных реле, установленных в узлах матрицы, и 5 таких же реле для изоляции узлов по линиям (А, В, С, D, Е).