

УДК 620.186:681.782.44(045)

**Закиев И.М.**

Национальный авиационный университет. Украина, г. Киев

### ОСОБЕННОСТИ ВЫТЕСНЕНИЯ МАТЕРИАЛА В ЗОНЕ МИКРОИНДЕНТИРОВАНИЯ

#### *Анотація*

*Показано, що при індентуванні різних матеріалів навколо відбитку виникають навали, розміри яких змінюються в залежності від навантажування на індентор. При малій глибині проникнення індентора це може привести до зміни контактної поверхні та обумовити масштабний фактор мікротвердості.*

#### *Abstract*

*It is shown that after indentation of different materials there is a tendency for material pile up around hardness impression, degree of piled up material depends on applied load. At small indentation depth this effect can lead to changing of contact are and cause microhardness size-effect.*

**Введение.** Одними из наиболее эффективных способов исследования физико-механических свойств поверхностного и приповерхностных слоев материалов являются испытания индентированием — методом непрерывного вдавливания индентором (depth sensing indentation). С помощью данного метода можно определять: микро- и нанотвердость, упругость, контактную жесткость, ползучесть, релаксационную восстанавливаемость, упругую и пластическую деформации под индентором, энергию активации, характеристики скачков деформации, моменты образования трещин, внутренние напряжения в приповерхностных слоях, пористость, адгезию и разрушение пленочных покрытий, анизотропию механических свойств, локальные закономерности трещинообразования, акустоэмиссионные явления, ряд трибологических и других служебных характеристик [1].

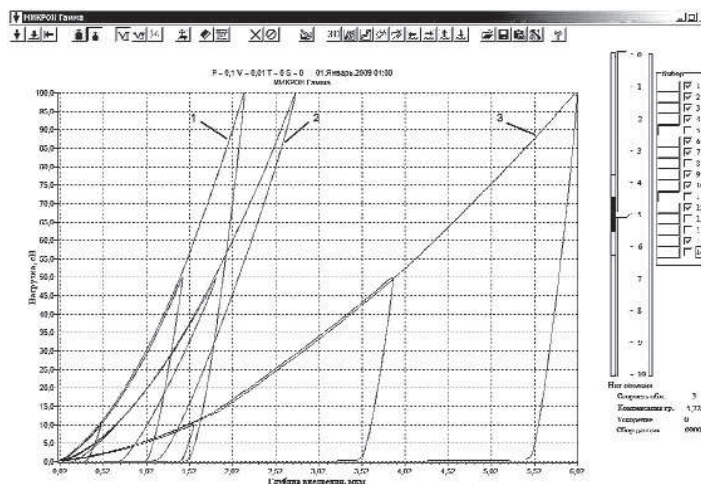
Несмотря на значительные достижения в области создания и совершенствования приборов для индентирования — индентометров, разработки новых методик индентирования, ряд вопросов, касающихся поведения материала при внедрении в него жесткого индентора, остается недостаточно исследованными. К ним относятся закономерности перемещения материала при действии высоких локальных напряжений под индентором, явление формирования навалов в области отпечатка. До сих пор нет четкого ответа на вопрос о размерах области распространения навала — сосредотачивается ли вытесненный материал вблизи зоны контакта, или же простирается дальше? Непонятно, приводит ли навал к увеличению контактной площади индентора и, соответственно, к искажениям результатов измерений, а также влияет ли образование навалов на масштабный фактор (МФ) при индентировании, заключающийся в увеличении твердости с уменьшением глубины внедрения (обычно при глубинах внедрения  $h \leq 1 - 100$  мкм [2, 3]).

Исследование подобных вопросов имеет большое значение для понимания микромеханизмов локального деформирования материалов при индентировании. Имеющиеся в литературе данные о численных значениях объема материала, вытесненного из-под индентора, достаточно противоречивы [3].

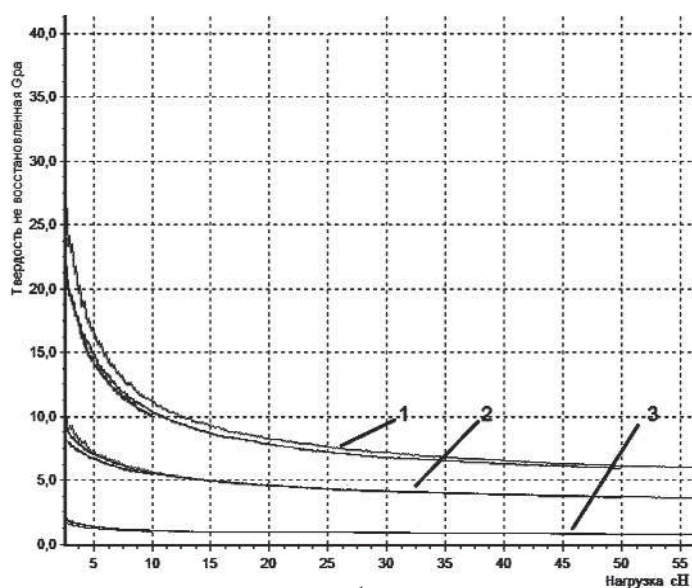
Таким образом, цель работы заключается в исследовании поведения различных материалов в зоне контакта индентора при разных нагрузках, определении области распространения навалов вблизи отпечатка. В работе исследовалась зависимость высоты и диаметра навала от нагрузки на индентор (глубины внедрения) и от типа материала.

**Решение задачи.** Образцы из инструментальной стали, монокристалла кварца и технически чистого алюминия исследовались при нагрузках 10, 50 и 100 сН на индентор. Отпечатки наносились индентором Берковича на универсальном нанотестере «Микрон-гамма» [4], а рельеф вокруг отпечатка регистрировался бесконтактным интерференционным профилометром «Микрон-альфа» [5]. В процессе индентирования были получены диаграммы внедрения (рис. 1, а) и графики зависимости микротвердости от нагрузки на индентор (рис. 1, б).

Из полученных результатов следует, что для стали МФ имеет ярко выраженный характер (рис. 1, б). В работе [6] природу МФ связывали с особенностями начального контакта индентора с поверхностью. Покажем, что на МФ может



а



б

Рис. 1. Интерфейс «Микрон-гамма» с диаграммами внедрения (а) и графиками зависимостей микротвердости от нагрузки (б) для:

1 — стали; 2 — кварца; 3 — алюминия

определяться также и наличием навалов при внедрении.

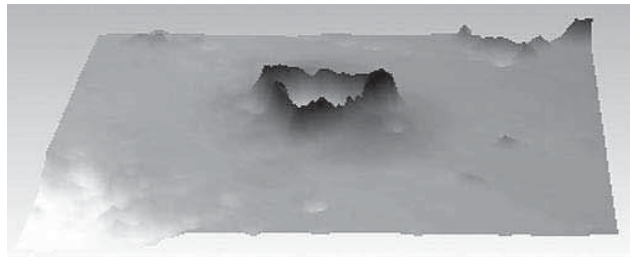
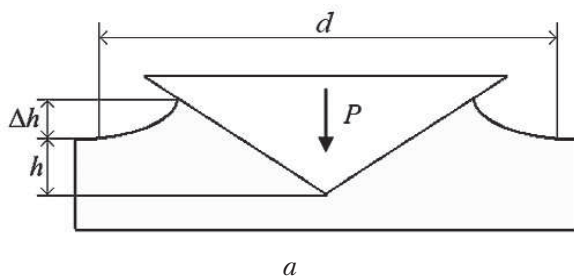
При возникновении навала глубина контакта индентора будет равна (рис. 2)  $h_c = h + \Delta h$ , а твердость определится по формуле

$$H = \frac{P}{A}, \quad (1)$$

где  $P$  — максимальная нагрузка;  $A$  — площадь проекции отпечатка для индентора Берковича:

$$A = 24,56 \cdot h_c^2. \quad (2)$$

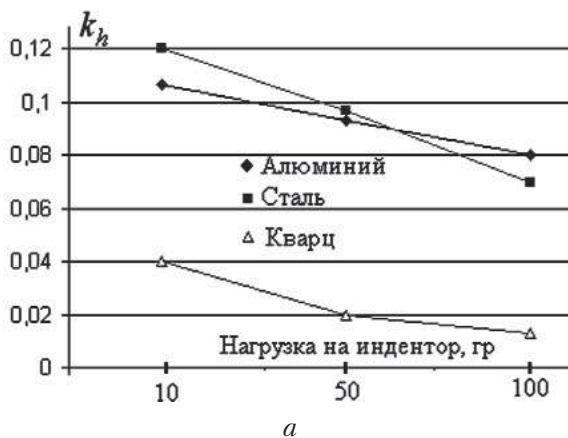
Количественно изменения размеров навалов можно описать с помощью коэффициентов относительного изменения их высоты  $k_h = \Delta h/h$  и диа-



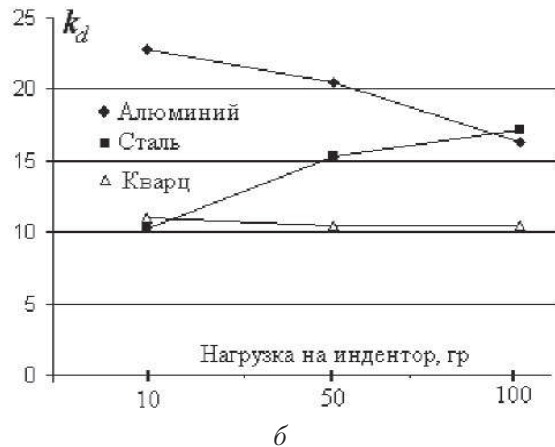
б

Рис. 2. Схема контакта индентора с образцом (а) и трехмерный профиль отпечатка индентора на поверхности алюминия при нагрузке 100 сН (б):

$h$  – глубина внедрения индентора,  $\Delta h$  – высота навала,  $d$  – диаметр навала (вытесненной части материала)

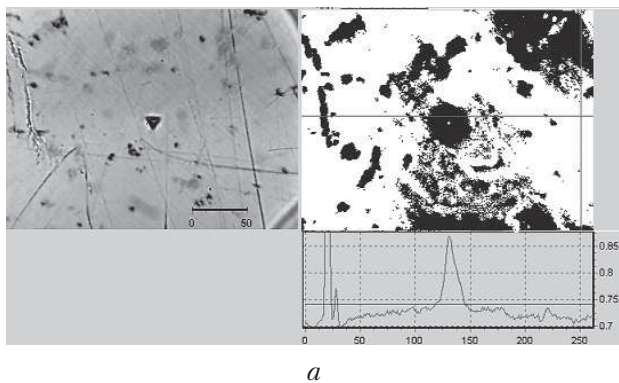


а

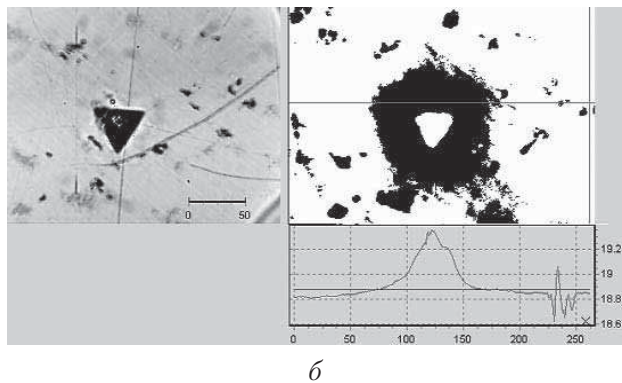


б

Рис. 3. Графики изменения относительной высоты  $k_h$  (а) и диаметра  $k_d$  (б) навалов от нагрузки на индентор для разных материалов



а



б

Рис. 4. Микрофотографии отпечатков и топографии навалов, полученные при индентировании алюминиевого образца при нагрузках 10 (а) и 100 сН (б)

метра  $k_d = \Delta h/d$ . На рис. 5 представлены зависимости коэффициентов  $k_h$  и  $k_d$  от нагрузки индентирования.

Таким образом, при малой глубине внедрения индентора относительная высота навала вокруг отпечатка будет всегда больше, чем при больших глубинах (рис. 3, а). При этом увеличение контактной площади при малых глубинах внедрения будет больше, чем при больших нагрузках. Следовательно, методика определения твердости по Оливеру и Фару [7], в которой не учитывается фактор навалов, будет приводить к завышению

показателя твердости (1) при малых глубинах внедрения.

После индентирования образцов, регистрировались трехмерные профили каждого отпечатка. Высота навалов  $\Delta h$  вычислялась по двумерным топографиям отпечатков, а диаметр  $d$  навалов определялся путем программного выделения выступов поверхности относительно плоскости образца. В качестве примера на рис. 4 и 5 приведены микрофотографии отпечатков с топографией навалов (выступающие зоны поверхности окрашены в темный цвет) и профилограммы вдоль навала.

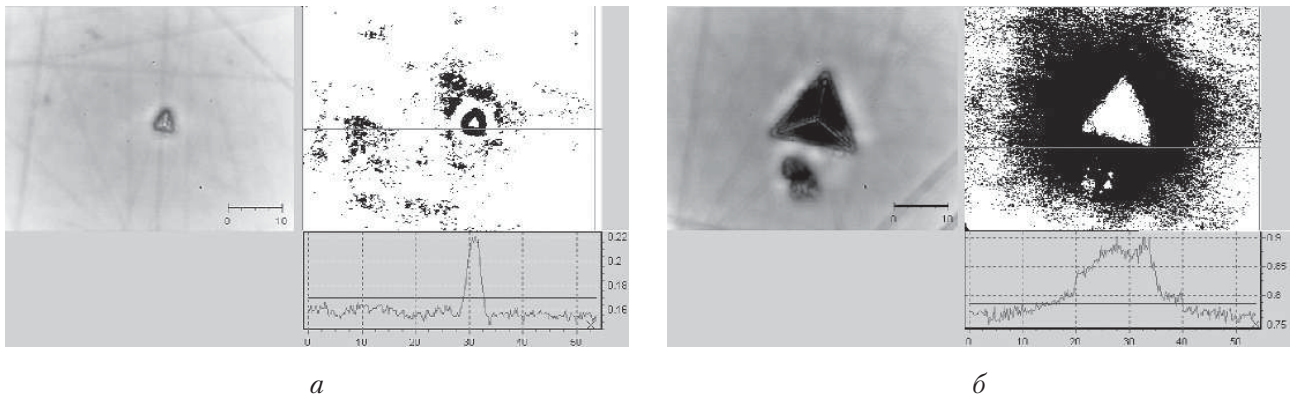


Рис. 5. Микрофотографии отпечатков и топографии навалов, полученные при индентировании стального образца при нагрузках 10 (а) и 100 сН (б)

### Выводы

1. Образование навалов при индентировании увеличивает контактную площадь, что может приводить к масштабному фактору микротвердости.
2. Относительный диаметр навала для различных материалов либо увеличивается, либо уменьшается с изменением глубины внедрения. Этот фактор может обуславливать степень влияния свойств материалов на МФ.
3. Для устранения МФ диаграмму внедрения при микро- и наноиндентировании необходимо корректировать с учетом степени изменения контактной площади, связанной с наличием навала.

### Литература

1. Головин Ю.И. Наноиндентирование и механические свойства твердых тел в субмикрорегионах, тонких приповерхностных слоях и пленках (обзор) // Физика твердого тела. — 2008. — Том 50. — Вып. 12. — С. 2113–2142.
2. Соифер Я.М., Вердян А. Исследование локальных механических свойств монокристаллов хлористого калия методом атомносиловой микро-

скопии // Физика твердого тела. — 2003. — Том 45. — Вып. 9. — С. 1621–1625.

3. Головин Ю.И., Тюрин А.И. Микро- и наноконтактное взаимодействие твердых тел // Природа. — 2003. — №4. — С. 60–68.

4. Прилад для випробування матеріалів на микротвердість: Патент на корисну модель № 30003 Україна, G01N 3/40 / С.Р. Ігнатів, І.М. Закієв, В.І. Закієв, Є.П. Дворник (Україна). — 200709512; Заявл. 21.08.2007; Опубл. 11.02.2008, Бюл. № 3. — 4 с.

5. Безконтактний тривимірний профілометр: Патент на корисну модель № 39972 Україна, G01B 9/02; 11/30 / С.Р. Ігнатів, І.М. Закієв, В.І. Закієв, С.С. Юцкевич (Україна). — u200809989; Заявл. 01.08.2008; Опубл. 25.03.2009, Бюл. № 6. — 3 с.: 2 іл.

6. Фирстов С.А., Игнатович С.Р., Закиев И.М. Размерный эффект при микро/наноиндентировании и его компенсация с учетом особенности начального контакта // Пробл. прочности. — 2009. — №2. — С. 43–54.

7. Oliver W.C., Pharr G.M. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments // J. Mater. Res. — 1992. — 7. — №6. — P. 1564–1583.