

## Механика материалов: прочность, ресурс, безопасность

УДК 620.171.2

### РАЗМЕРНЫЙ ЭФФЕКТ И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА МИКРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АБРАЗИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ

© О. И. Пушкарев, О. Г. Кулик, Л. А. Никуйко<sup>1</sup>*Статья поступила 22 октября 2015 г.*

Исследовано влияние размерного эффекта на микромеханические свойства частиц абразивных материалов размером от 250 до 400 мкм с помощью микротвердомера. Оценены микротвердость, микрохрупкость и микропрочность материалов в зависимости от глубины внедрения алмазной пирамиды Виккерса в исследуемую поверхность толщиной от 0,4 до 6,0 мкм. Критерий микрохрупкости характеризует соотношение площади, охваченной хрупким разрушением в районе отпечатка и площади самого отпечатка, а показатель микротвердости — напряжение, необходимое для образования площади хрупкого разрушения в районе отпечатка пирамиды. Установлена степенная зависимость указанных свойств от глубины внедрения пирамиды: чем она меньше, тем больше микротвердость материалов и меньше их микрохрупкость. Комплекс методов микромеханических испытаний с помощью микротвердомера позволяет аттестовать абразивные материалы в заводских и научно-исследовательских лабораториях в зависимости от режимов их физико-технической обработки. На основе проведенных исследований разработан проект стандарта организации «Контроль качества абразивных материалов по микромеханическим характеристикам».

**Ключевые слова:** размерный эффект; микротвердость; микрохрупкость; микропрочность; методика испытаний; микротвердомер; микромеханические свойства; эксплуатационные свойства; абразивные материалы; заводские лаборатории.

В последние годы резко возрос научно-практический интерес к размерному эффекту и его влиянию на микромеханические свойства материалов. Это вызвано бурным развитием наноматериаловедения и нанотехнологий [1 – 4].

Установлено, что испытания материалов вдавливанием индентора наиболее перспективны для выявления изменений микромеханических свойств на разных размерных уровнях — по геометрическим параметрам отпечатка пирамиды Виккерса, в частности по его глубине.

В связи с этим нами изучены микротвердость, микрохрупкость и микропрочность частиц (зерен) абразивных материалов разных видов размером от 250 до 400 мкм с помощью микротвердомера [5], позволяющего получать отпечатки глубиной от 0,1 до 30 мкм под нагрузкой в диапазоне от 0,10 до 20 Н. Общий вид прибора показан на рис. 1.

В качестве индентора использовали четырехгранную алмазную пирамиду Виккерса с углом при вершине 136°. Схема испытаний и общий вид полученных отпечатков индентора представлены на рис. 2 и 3.

При каждой из нагрузок на поверхность шлифа абразива наносили не менее 50 отпечатков индентора.

При этом коэффициент вариации при расчете микротвердости не превысил 0,04, а микрохрупкости и микропрочности — 0,06.

Для всех исследованных абразивных материалов зависимости микротвердости, микрохрупкости и микропрочности от глубины внедрения индентора (масштабного фактора испытаний) в логарифмических координатах аппроксимировались прямыми линиями с достаточно высоким коэффициентом корреляции (0,95). Средние значения экспериментальных данных показаны на рис. 4 на примере различающихся между собой по микромеханическим свойствам образцов абразивных материалов.

Микротвердость определяли по формуле

$$H = \frac{1,854P}{(7h)^2}, \quad (1)$$

где  $H$  — микротвердость по Виккерсу, ГПа;  $P$  — нагрузка на пирамиду, Н;  $h$  — глубина внедрения индентора, мкм. Микротвердость (см. рис. 4, а) не является постоянной величиной: она уменьшается с ростом нагрузки на пирамиду. Поэтому оценка микротвердости абразивов по числам микротвердости, полученным на основании большого числа отпечатков при одной или двух произвольно выбранных нагрузках, неудовлетворительна.

<sup>1</sup> Волжский институт строительства и технологий (филиал) ВолгГАСУ, г. Волжский, Волгоградская обл., Россия; e-mail: info@visteh.net

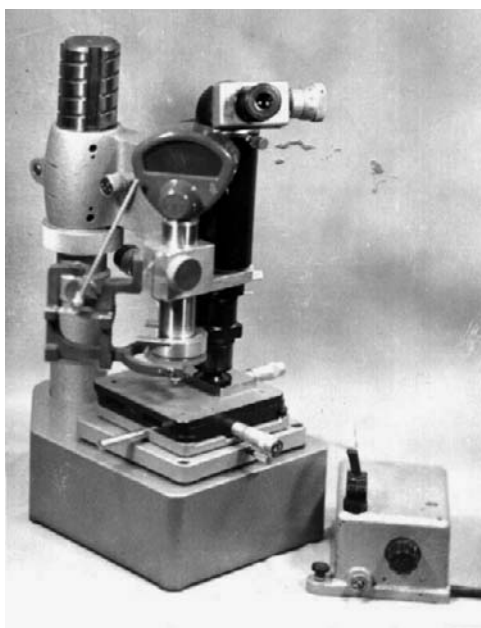


Рис. 1. Общий вид прибора для испытаний по глубине отпечатка индентора

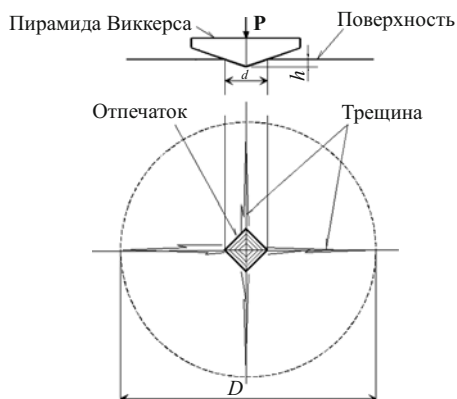


Рис. 2. Схема испытаний методом микровдавливания (нагрузка на индентор от 0,1 до 2,0 Н):  $d$  — диагональ отпечатка индентора, мм;  $D$  — зона хрупкой повреждаемости материала в районе отпечатка индентора, мкм;  $h$  — глубина внедрения индентора, мкм

Такую оценку необходимо проводить на основании построения зависимости микротвердости от глубины проникновения пирамиды в поверхность шлифа. Сопоставлять различные абразивные материалы следует по числам микротвердости для одинаковых по толщине поверхностных слоев.

Зависимость микротвердости от глубины отпечатка для всех исследованных абразивов описывается формулой

$$H = H_0 h^{n_H} = H_0 h^{-0,18}, \quad (2)$$

где  $H_0$  и  $n_H$  — размерная и безразмерная постоянные этой формулы;  $h = d/7$  — глубина отпечатка пирамиды Виккерса, мкм.

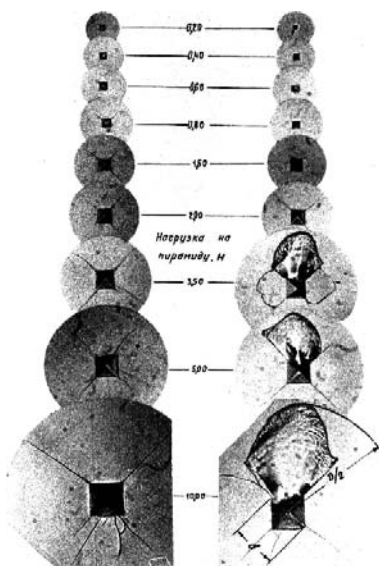


Рис. 3. Общий вид отпечатков пирамиды Виккерса и зона хрупкой повреждаемости материала в районе этих отпечатков на монокристаллах карбида кремния при возрастании нагрузки от 0,2 до 10 Н ( $\times 400$ )

Методом наименьших квадратов получено, что безразмерная постоянная  $n_H = -0,18$  одинакова для всех исследованных материалов. Это указывает на единую природу упругопластического деформирования различных абразивных материалов при вдавливании квадратной алмазной пирамиды. Размерная постоянная формулы  $H_0$ , являющаяся микротвердостью поверхностного слоя толщиной в одну единицу (например, 1 мкм), может служить численной критерияльной оценкой микротвердости абразивного зерна.

Из формулы (2) видно, что при  $h$ , равной единице, численные значения  $H$  и  $H_0$  будут равны. Поэтому критерий микротвердости  $H_0$  может быть найден из рис. 4, а при  $h = 1,0$  мкм.

Все исследованные абразивные материалы различаются по микротвердости, причем это различие надежно прослеживается в очень широком диапазоне нагрузок на пирамиду. Для практического использования критерия микротвердости  $H_0$  достаточно определить микротвердость испытуемого образца абразива при двух различных нагрузках на пирамиду (например, 1,0 Н и 2,0 Н), а затем с помощью формулы (2) вычислить критерий  $H_0$ .

Микрохрупкость оценивали с помощью показателя

$$\gamma = \frac{D_{cp}^2 - d^2}{d^2}, \quad (3)$$

где  $d = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N d_i$ ;

$$D_{cp} = \frac{1}{N} \left( \sum_{i=1}^n D_{тр,i} + \sum_{i=1}^{N-n} d_i \right) = \frac{nD_{тр} + (N-n)d}{N}, \quad (4)$$

$n$  — число отпечатков с трещинами,  $N$  — общее число отпечатков при данной нагрузке,  $d$  и  $D_{cp}$  — средние размеры диагонали отпечатка и зоны повреждаемости,  $D_{тр}$  — средний размеры зоны повреждаемости для  $n$

отпечатков, имеющих эту зону. Величина  $D_{cp}$  меняется с ростом нагрузки на пирамиду от  $d$  (при  $n = 0$ ) до  $D_{тр}$  (при  $n = N$ ).

Критерий микрохрупкости  $\gamma$  характеризует соотношение площади, охваченной хрупким разрушением в районе отпечатка, и площади самого отпечатка. Поскольку факт появления остаточного отпечатка является проявлением пластических свойств используемого материала, а зона повреждаемости в районе этого отпечатка исключительно хрупкого происхождения, то критерий  $\gamma$  характеризует соотношение хрупких и пластических свойств абразивного материала. Чем более хрупок материал, тем  $\gamma$  больше. Предельно малое значение  $\gamma$  равно нулю.

Зависимость показателя микрохрупкости  $\gamma$  от глубины  $h$  погружения пирамиды в поверхность шлифа описывается степенной функцией:

$$\gamma = (\gamma_0 + 1)h^{n_\gamma} - 1 = (\gamma_0 + 1)h^{0,82} - 1, \quad (5)$$

где  $\gamma_0$  и  $n_\gamma$  — размерная и безразмерная постоянные.

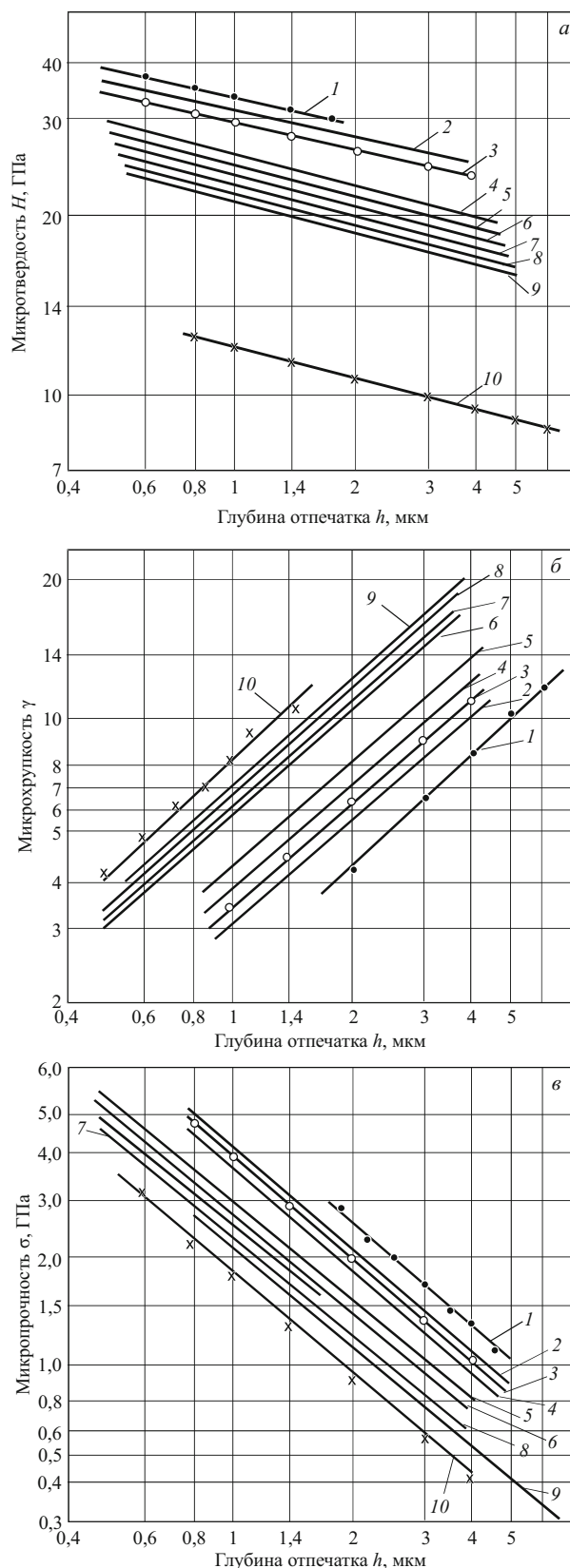
Методом наименьших квадратов установлено, что безразмерная постоянная  $n_\gamma = 0,82$  одинакова для всех исследованных абразивных материалов и от их хрупких свойств не зависит. Это указывает на единую природу хрупкого разрушения в районе отпечатка, которое сопровождается упругопластическое деформирование различных абразивных материалов при вдавливании пирамиды. Постоянная  $\gamma_0$  сильно зависит от хрупких свойств абразивов и поэтому может служить критериальной оценкой их микрохрупкости. Из формулы (5) видно, что численные значения  $\gamma$  и  $\gamma_0$  могут быть найдены из рис. 4, б при  $h = 1$  мкм.

Все исследованные абразивные материалы хорошо различаются по критерию микрохрупкости (см. рис. 4, б), причем это различие надежно прослеживается в очень широком диапазоне нагрузок на пирамиду. Для практического использования критерия микрохрупкости  $\gamma$  совсем не обязательно применять высокий диапазон нагрузок. Достаточно взять две различные нагрузки на пирамиду (например, 1,0 Н и 2,0 Н), определить на основании 25 – 50 отпечатков  $\gamma = D_{тр}^2/d^2 - 1$  при каждой нагрузке, а затем с помощью формулы (5) вычислить критерий микрохрупкости  $\gamma_0$ .

Размеры зоны хрупкой повреждаемости слоев испытуемого материала вокруг отпечатка зависят как от степени внешнего силового воздействия на эти слои, так и от их прочностных свойств. Поэтому для оценки микропрочности абразивных материалов при вдавливании пирамиды предложен критерий, который учитывает и внешнее силовое воздействие, и размеры зоны хрупкой повреждаемости в районе отпечатка:

$$\sigma = p/D_{cp}^2, \text{ ГПа.} \quad (6)$$

Таким образом, показатель микропрочности  $\sigma$  — это напряжение, необходимое для образования единицы



**Рис. 4.** Микротвердость  $H$  (а), микрохрупкость  $\gamma$  (б) и микропрочность  $\sigma$  (в) зерен различных абразивных материалов в зависимости от глубины  $h$  проникновения алмазной пирамиды в поверхность шлифа (в логарифмических координатах): 1 — борид вольфрама; 2 — карбид кремния черный; 3 — карбид кремния зеленый; 4 — электрокорунд хромистый; 5 — электрокорунд хромтитанистый; 6 — электрокорунд белый; 7 — электрокорунд нормальный; 8 — карбид циркония; 9 — карбид вольфрама; 10 — кварцевый песок

площади хрупкого разрушения в районе отпечатка пирамиды. Установлено, что  $\sigma$  зависит от глубины погружения пирамиды  $h$  в поверхность шлифа (см. рис. 4, в), что описывается формулой

$$\sigma = \sigma_0 h^{n_\sigma} = \sigma_0 h^{-1}, \quad (7)$$

где  $\sigma_0$  и  $n_\sigma$  — размерная и безразмерная постоянные.

Методом наименьших квадратов получено, что безразмерная постоянная  $n_\sigma$  одинакова для всех исследованных материалов и от их хрупких и прочностных свойств не зависит ( $n_\sigma = -1,0$ ). Это указывает на единую природу хрупкого разрушения абразивных материалов, которое сопровождается их упругопластическое деформирование при вдавливании пирамиды. Размерная постоянная  $\sigma_0$  сильно зависит от хрупких и прочностных свойств абразивных материалов и поэтому может служить критериальной оценкой их микропрочности. Из формулы (7) видно, что при  $h$ , равном единице, численные значения  $\sigma$  и  $\sigma_0$  равны. Поэтому критерий хрупкой микропрочности  $\sigma_0$ , численно равный  $\sigma$ , может быть найден из рис. 4, в при  $h = 1$  мкм. Видно (см. рис. 4, в), что все исследованные материалы хорошо различаются по критерию микропрочности  $\sigma$ , причем это различие, как и по микрохрупкости, надежно прослеживается в очень широком диапазоне нагрузок на пирамиду.

Для практического использования  $\sigma$  достаточно взять две нагрузки на пирамиду, определить на основании от 25 до 50 отпечатков  $\sigma$  при каждой нагрузке, а затем с помощью формулы (7) вычислить критерий микропрочности  $\sigma_0$ .

Результаты проведенной оценки механических свойств исследованных абразивных материалов хорошо согласуются с данными их эксплуатационных свойств: чем меньше микрохрупкость и больше микропрочность абразива, тем выше его износостойкость

при микрорезании единичным зерном и режущая способность кругов из этого абразива при шлифовании.

Комплекс методов микромеханических испытаний, реализуемых с помощью микротвердомера, позволяет аттестовывать абразивные материалы в заводских и научно-исследовательских лабораториях.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Матюнин В. М. Размерный эффект и его влияние на механические свойства материалов / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2012. Т. 78. № 2. С. 64 – 68.
2. Матюнин В. М., Дубов А. А., Марченко А. Ю. Общие закономерности проявления масштабного фактора при определении прочности и твердости металла / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2010. Т. 72. № 8. С. 43 – 47.
3. Головин Ю. И. Наноиндентирование и его возможности. — М.: Машиностроение, 2009. — 312 с.
4. Матюнин В. М. Оперативная диагностика механических свойств конструкционных материалов. — М.: Изд. дом МЭИ, 2006. — 214 с.
5. Бердиков В. Ф., Пушкарев О. И., Артемьева Ю. И. Приспособление к прибору ПТМ-3 для испытаний по глубине отпечатка / Заводская лаборатория. 1989. Т. 42. № 6. С. 127 – 128.

## REFERENCES

1. Matyunin V. M. Razmernyi éffekt i ego vliyanie na mekhanicheskie svoistva materialov [The influence of scale effect on the mechanical properties of materials] / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2012. Vol. 78. N 2. P. 64 – 68 [in Russian].
2. Matyunin V. M., Dubov A. A., Marchenko A. Yu. Obshchie zakonomernosti proyavleniya masshtabnogo faktora pri opredelenii prochnosti i tverdosti metalla [General regularities in manifestation of the scale factor in determination of the strength and hardness of metals] / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2010. Vol. 72. N 8. P. 43 – 47 [in Russian].
3. Golovin Yu. I. Nanoindentirovanie i ego vozmozhnosti [Nanoindentation and its possibilities]. — Moscow: Mashinostroenie, 2009. — 312 p. [in Russian].
4. Matyunin V. M. Operativnaya diagnostika mekhanicheskikh svoisty konstruktsionnykh materialov [Rapid diagnosis of mechanical properties of structural materials]. — Moscow: Izd. dom MÉI, 2006. — 214 p. [in Russian].
5. Berdikov V. F., Pushkarev O. I., Artem'eva Yu. I. Prispособlenie k priboru PTM-3 dlya ispytaniy po glubine otechatka [The fixture to the instrument PTM-3 for testing the depth of the imprint] / Zavod. Lab. 1989. Vol. 42. N 6. P. 127 – 128 [in Russian].