

УДК 620.178.143

МАСШТАБНЫЙ ЭФФЕКТ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ ЦАРАПАНИЕМ МАТЕРИАЛОВ С РАЗНЫМ ДЕФОРМИРУЕМЫМ ОБЪЕМОМ¹

© А. Ю. Марченков², Е. В. Терентьев²*Статья поступила 20 сентября 2016 г.*

Исследовано влияние масштабного фактора на результаты определения механических характеристик металлов и сплавов методом царапания остроконечным индентором с регистрацией диаграмм деформирования в координатах усилие царапания – длина царапины. Показаны преимущества использования метода царапания с постоянной заданной глубиной для контроля механических характеристик материалов и покрытий. Исследовано влияние глубины царапины на определяемые значения механических характеристик — твердости при царапании и удельной энергии локального разрушения — при испытаниях материалов царапанием ребром четырехгранной пирамиды Виккерса. Установлено, что масштабный эффект при испытаниях царапанием индентором проявляется достаточно интенсивно — при уменьшении глубины царапины возрастает сопротивление металла деформации, увеличиваются определяемые значения твердости и повышается значение удельной энергии его разрушения за счет многократного уменьшения деформируемого объема металла. Исходя из этого, при сравнительных испытаниях нескольких материалов или покрытий рекомендовано проводить испытания при постоянной заданной глубине царапания. В этом случае деформируемые объемы материалов будут близки и влияние масштабного фактора на результаты определения механических характеристик — одинаково.

Ключевые слова: индентирование; царапание; твердость; энергия локального разрушения.

В последнее время в материаловедении и механике материалов все чаще появляется необходимость определения механических свойств малых объемов материала — тонких пленок, поверхностных упрочненных слоев, покрытий различного назначения, отдельных структурных составляющих. Для этих целей одним из наиболее эффективных способов является индентирование — испытание вдавливанием или царапанием материалов индентором. Метод индентирования позволяет с высокой производительностью определить основные характеристики твердости, прочности и трещиностойкости испытуемого материала, в том числе и в его малых объемах. Он может быть использован в качестве способа экспресс-контроля механических характеристик на этапе выбора режимов технологии обработки поверхностей изделий, а также для безобразцового неразрушающего контроля готовых изделий [1].

Для изделий малой толщины (пленок, покрытий и др.) метод индентирования зачастую является единственно возможным способом определения механических характеристик. Однако при индентировании малых объемов материала, как и при других видах ме-

ханических испытаний, проявляется масштабный (размерный) эффект, заключающийся в зависимости определяемых параметров от величины деформируемого в процессе испытания объема металла [1 – 4]. Среди основных причин масштабного эффекта выделяют физические (изменение схемы напряженно-деформированного состояния, механизма пластической деформации, повышение удельной поверхности отпечатка при уменьшении деформированного объема и др.), технологические (например, наличие технологического наклепа) и инструментальные (влияние радиуса скругления индентора при вершине, вибрации индентора и др.) [2]. Влияние масштабного эффекта на результаты испытаний вдавливанием индентора исследовано в российских и зарубежных работах достаточно подробно. Установлено, что для материалов, находящихся в вязком или хрупковязком состоянии, определяемые значения твердости чаще всего увеличиваются при уменьшении нагрузки вдавливания и величины деформируемого объема [1, 2, 5]. Особенно сильно масштабный эффект проявляется при переходе к микро- и наноуровню индентирования, где глубины отпечатков составляют от нескольких микрон до десятков нанометров.

Явление масштабного эффекта при испытаниях вдавливанием индентора исследуется достаточно активно, тогда как сведения о влиянии масштабного фактора на результаты определения механических ха-

¹ Данное научное исследование проводится при поддержке Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере по программе «УМНИК» в рамках соглашений № 5948 ГУ2/2015 от 11.06.2015 г. и № 589 ГУ1/2013 от 19.11.2013 г.

² Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия; e-mail: art-marchenkov@yandex.ru

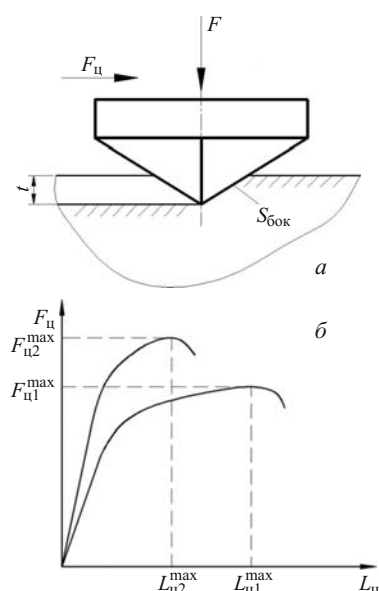


Рис. 1. Схема испытания материалов царапанием (а) и диаграмм царапания в координатах усилие царапания $F_{ц}$ — длина царапины $L_{ц}$ для двух различных материалов (б): F — осевая нагрузка; $F_{ц}$ — усилие царапания; t — глубина царапины; $S_{бок}$ — площадь боковой контактной поверхности

рактических характеристик материалов методом царапания индентором весьма ограничены.

Существующие методики испытаний царапанием индентором основаны на непрерывном деформировании испытуемого материала до предельного состояния и последующем его разрушении путем горизонтального перемещения индентора, предварительно внедренного в поверхность под заданной нагрузкой или на заданную глубину. Согласно стандарту [6] царапание осуществляют при заданной постоянной нагрузке и затем оптическими средствами измеряют геометрические параметры царапин, с использованием которых рассчитывают значения механических свойств металла. Такой метод достаточно трудоемок, его трудно автоматизировать.

В НИУ «МЭИ» разработана методика [7] и создан прибор МЭИ-С5А для испытания тонких поверхностных слоев материалов, включая покрытия, кинетическим царапанием с регистрацией диаграмм деформирования в координатах усилие царапания $F_{ц}$ — длина царапины $L_{ц}$ (рис. 1) [2].

Царапание осуществляют при постоянной заданной глубине внедрения индентора (остроконечного), так как при этом обеспечиваются одинаковые деформируемые объемы материала как мягкого, так и твердого. Это позволяет более обоснованно оценивать и сравнивать механические характеристики разных материалов за счет одинакового влияния масштабного фактора на полученные результаты. При испытаниях царапанием остроконечным индентором (пирамида Виккерса, конус и др.) испытуемый материал доводится до разрушения, что дает возможность определять его не только сопротивление локальному нагружению,

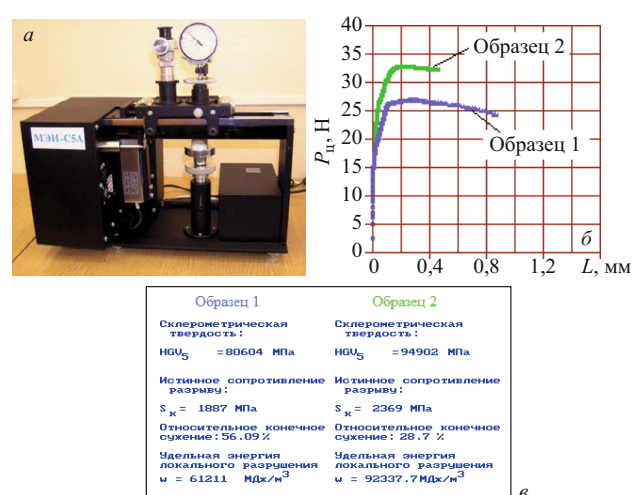


Рис. 2. Автоматизированный прибор-склерометр МЭИ-С5А (а), диаграммы царапания для двух сталей (б) и результаты определения их механических характеристик (в)

т.е. твердость, но и прочностные и энергетические характеристики в области разрушения.

Твердость при царапании равна отношению максимального усилия царапания $F_{ц}^{\max}$ к боковой контактной поверхности индентора $S_{бок}$:

$$HGV_t = \frac{F_{ц}^{\max}}{S_{бок}}, \quad (1)$$

где HG — твердость при царапании; V — символ пирамиды Виккерса, которой осуществляется царапание; t — индекс, указывающий глубину внедрения пирамиды.

Диаграмма царапания включает участок упругой деформации, участок упрочнения с достижением максимального усилия $F_{ц}^{\max}$, соответствующего длине царапины $L_{ц}^{\max}$. В момент достижения $F_{ц}^{\max}$ происходит локальное разрушение материала в вершине наплыва перед индентором и небольшой спад нагрузки. По значениям $F_{ц}^{\max}$ и $L_{ц}^{\max}$ можно рассчитать абсолютную энергию локального разрушения:

$$W_{ц} = \int_0^{L_{ц}^{\max}} F_{ц} dL_{ц}. \quad (2)$$

Если отнести $W_{ц}$ к объему материала $V_{ц}$, вытесненному из царапины длиной $L_{ц}^{\max}$, то получим удельную энергию локального разрушения $w_{ц}$, которая является одним из наиболее информативных параметров, характеризующих сопротивление материала разрушению:

$$w_{ц} = \frac{W_{ц}}{V_{ц}} = \frac{W_{ц}}{S_{бок} L_{ц}^{\max}}. \quad (3)$$

Результаты исследования влияния глубины царапания на механические характеристики сплава АМц и стали 12Х18Н9

Материал	Глубина царапания t , мкм	Максимальное усилие царапания $F_{\text{ц}}^{\text{max}}$, Н	Твердость при царапании HGV , Н/мм ²	Удельная энергия локального разрушения $\omega_{\text{ц}}$, МДж/м ³
Сплав АМц	25	10	1216	5334
	50	32	972	4083
	75	53	716	3081
	100	80	608	2615
Сталь 12Х18Н9	10	10	7600	34 732
	15	20	6755	28 900
	20	31	5890	21 875
	40	80	3800	14 063

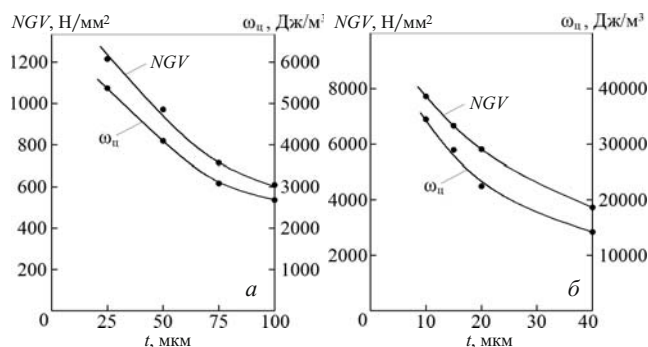


Рис. 3. Зависимости твердости при царапании HGV и удельной энергии локального разрушения $\omega_{\text{ц}}$ от глубины царапины: a — сплав АМц; b — сталь 12Х18Н9

На рис. 2 представлен внешний вид автоматизированного прибора-склерометра МЭИ-С5А (a), а также пример диаграмм царапания для двух различных материалов (b) с результатами определения их механических характеристик в автоматизированном режиме ($в$).

Проводили исследования влияния масштабного фактора на результаты определения механических характеристик двух материалов — сплава на основе алюминия АМц и стали аустенитного класса 12Х18Н9 — при испытании на приборе-склерометре МЭИ-С5А.

На плоскую поверхность подготовленного шлифа наносили несколько царапин различной глубины. Царапание проводили ребром четырехгранной пирамиды Виккерса с углом между противоположными гранями $\alpha = 136^\circ$. В процессе царапания регистрировали диаграмму, по которой определяли твердость HGV и удельную энергию локального разрушения $\omega_{\text{ц}}$ с использованием формул (1) и (3) соответственно. По полученным результатам (см. таблицу) для обоих исследуемых материалов построили графические зависимости твердости при царапании HGV и удельной энергии локального разрушения $\omega_{\text{ц}}$ от глубины царапины (рис. 3).

Видно, что для обоих исследованных материалов характерно увеличение значений механических характеристик (твердости при царапании HGV и удельной энергии локального разрушения $\omega_{\text{ц}}$) при уменьшении глубины царапины за счет многократного уменьшения деформируемого объема металла. Масштабный эффект при царапании проявляется более интенсивно, чем при испытаниях вдавливанием индентора. Исходя из этого, при сравнительных испытаниях нескольких материалов или покрытий необходимо проводить царапание при одной заданной глубине. В этом случае деформируемые объемы материалов будут близки и влияние масштабного фактора на результаты определения механических характеристик — одинаково. При выборе глубины царапания следует учитывать, что отношение толщины контролируемого объекта к глубине царапины должно быть не менее 10. Это исключит влияние подложки при испытаниях царапанием покрытий и тонких упрочненных слоев материала или влияние предметного столика при испытаниях изделий малой толщины на результаты определения их механических характеристик [6].

ЛИТЕРАТУРА

1. Матюнин В. М. Индентирование в диагностике механических свойств материалов. — М.: Издательский дом МЭИ, 2015. — 288 с.
2. Федосов С. А., Пешек Л. Определение механических свойств материалов микроиндентированием. — М.: МГУ, 2004. — 98 с.
3. Головин Ю. И. Наноиндентирование и его возможности. — М.: Машиностроение, 2009. — 312 с.
4. Матюнин В. М., Дубов А. А., Марченков А. Ю. Общие закономерности проявления масштабного фактора при определении прочности и твердости металла / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2010. Т. 76. № 8. С. 43 – 47.
5. Матюнин В. М., Дубов А. А., Марченков А. Ю. Масштабный фактор при определении твердости металлических материалов / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2009. Т. 75. № 9. С. 59 – 62.
6. ГОСТ 21318–75. Измерение микротвердости царапанием алмазными наконечниками. — М.: Изд-во стандартов, 1976. — 30 с.
7. Пат. 2451283 Российская Федерация. Способ выявления неоднородности распределения механических свойств металла / В. М. Матюнин, П. В. Волков, А. Ю. Марченков. — № 2010152726/28; заявл. 23.12.10; опубл. 20.05.12. Бюл. № 14.

UDC 620.178.143

SCALE FACTOR IN SCRATCH TESTS OF THE MATERIALS WITH DIFFERENT ELASTIC VOLUME

© A. Yu. Marchenkov and E. V. Terentyev

Submitted September 20, 2016.

Experimental study of the scale factor impact on determination of the mechanical characteristics of metals and alloys in scratch indentation tests with recording “scratch intensity – scratch length” deformation diagrams is presented. The advantages of using the scratching method with a constant preset depth for control of the mechanical characteristics of materials and coatings are shown. The effect of the scratch depth on the determined values of the mechanical characteristics – scratch hardness and specific energy of local destruction — is studied in scratching tests using the edge of the Vickers tetrahedral pyramid. It is shown that the scale effect in scratching tests is manifested rather clearly. As the scratch depth decreases, the strain resistance, scratch hardness and specific fracture energy grow due to a multiple reduction of the elastic volume of the metal. For this reason, we recommend to use a constant preset scratch depth in comparative scratch testing of several materials or coatings thus providing close values of the elastic volumes of the materials and the same impact of the scale factor on the results of measuring the mechanical characteristics of the material.

Keywords: indentation; scratch-test; hardness; specific fracture energy.

REFERENCES

1. Matyunin V. M. Indentation as the mechanical properties diagnostics method. — Moscow: Izd. dom M&E, 2015. — 288 p. [in Russian].
2. Fedosov S. A., Peshek L. The application of microindentation methods for materials mechanical properties evaluation. — Moscow: MGU, 2004. — 98 p. [in Russian].
3. Golovin Yu. I. Nanoindentation and its potential. — Moscow: Mashinostroenie, 2009. — 312 p. [in Russian].
4. Matyunin V. M., Dubov A. A., Marchenkov A. Yu. The common regularities of scale factor in strength hardness tests / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2010. Vol. 76. N 8. P. 43 – 47 [in Russian].
5. Matyunin V. M., Dubov A. A., Marchenkov A. Yu. Scale factor in determining the hardness of metal materials / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2009. Vol. 75. N 9. P. 59 – 62 [in Russian].
6. RF State Standard GOST 21318–75. Microhardness evaluation using scratch-test method. — Moscow: 1976. — 30 p. [in Russian].
7. RF Pat. No. 2451283. Mechanical properties heterogeneities detection method / V. M. Matyunin, P. V. Volkov, A. Yu. Marchenkov. — N 2010152726/28; priority date 23.12.2010; publ. 20.05.2012, Byull. Otkryt. Izobret. N 14.