

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2026. №2 (176). С.3-12.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2026. №2 (176). P.3-12.

Научная статья
УДК 620.178.146: 620.178.152.341
doi: 10.30987/2223-4608-2026-2-3-12

Влияние размерного эффекта на результаты измерения микротвердости методами скретч-тестирования и Виккерса

Константин Васильевич Макаренко¹, д.т.н.

Ирина Александровна Котлярова², к.т.н.

Дмитрий Алексеевич Илюшкин³, к.т.н.

Екатерина Александровна Зенцова⁴, ст. преподаватель

Александр Евгеньевич Яценко⁵, гл. инженер

^{1, 2, 3, 4} Брянский государственный технический университет, Брянск, Россия;

⁵ АО «ГРУППА КРЕМНИЙ ЭЛ», Брянск, Россия

¹ makkon1@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7195-0500>

² ikotlyarova@list.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6162-0199>

³ shirke@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4265-9570>

⁴ kopilka.32@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1513-3271>

⁵ Koh1504@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

Аннотация. В работе представлен сравнительный анализ двух методов определения микротвердости. Изучено влияние размерного эффекта на значения микротвердости, определяемой методами динамического скретч-тестирования и статического по Виккерсу. Размерный эффект демонстрирует зависимость показателей твердости от прикладываемой нагрузки на индентор, в частности при уменьшении нагрузки при индентировании показания значений твердости могут либо уменьшаться, либо, напротив, увеличиваться. Для одной из вариаций реализации метода скретч-тестирования характерна постепенно возрастающая нагрузка, в этом случае может возникать прямой или обратный размерный эффект. Исследования проводили на медной холоднодеформированной ленте толщиной 250 мкм. Для метода скретч-тестирования изменяли диапазон нагружения от 1 до 2 Н и способ приложения нагрузки, а при контроле микротвердости методом Виккерса использовали постоянную нагрузку 2 Н. Изучение влияния размерного эффекта на результаты изменения микротвердости осуществляли путем дополнительных исследований отпечатков индентирования на двух типах оптических микроскопов при разных увеличениях. Показано, что с увеличением нагрузки индентирования микротвердость меди монотонно уменьшается, т.е. наблюдается прямой размерный эффект. По результатам исследований было определено, что с увеличением нагрузки средняя микротвердость HBS меди монотонно уменьшается в среднем на 12,1 ГПа на каждые 0,1 Н, что объясняется уменьшением размера зоны деформирования при уменьшении нагрузки на индентор. Сравнительный анализ двух методов определения микротвердости позволил определить характерные преимущества метода скретч-тестирования перед классическим методом Виккерса. Скретч-тестирование отличается значительно более высокой чувствительностью к неоднородности значений твердости и структуры материала при той же нагрузке и площади образца для проведения испытаний, чем метод Виккерса. Результаты исследования могут быть использованы при исследовании механических свойств материалов и покрытий, в том числе отличающихся анизотропией свойств.

Ключевые слова: размерный эффект, микротвердость, скретч-тестирование, метод Виккерса, микроскопия, статистический анализ

Благодарности: экспериментальные исследования проведены с использованием оборудования лаборатории учебного дизайн-центра «Разработка, испытания и реверс-инжиниринг электронной компонентной базы» и лаборатории «Волнового деформационного и комбинированного упрочнения в аддитивных и субтрактивных технологиях», БГТУ.

Для цитирования: Макаренко К.В., Котлярова И.А., Илюшкин Д.А., Зенцова Е.А., Яценко А.Е. Изучение влияния размерного эффекта на результаты измерения микротвердости методами скретч-тестирования и Виккерса // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2026. № 2 (176). С. 3–12. doi: 10.30987/2223-4608-2026-2-3-12

Dimensional effect impact on microhardness measurement results through scratch testing and Vickers methods

Konstantin V. Makarenko¹, D. Eng.

Irina A. Kotlyarova², PhD. Eng.

Dmitry A. Ilyushkin³, PhD. Eng.

Ekaterina A. Zentsova⁴, senior lecturer

Alexander E. Yatsenko⁵, Chief Engineer

^{1, 2, 3, 4} Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia

⁵ SILICON EL GROUP JSC, Bryansk, Russia

¹ makkon1@yandex.ru

² ikotlyarova@list.ru

³ shirke@mail.ru

⁴ kopilka.32@mail.ru

⁵ Koh1504@gmail.com

Abstract. The paper presents a comparative analysis of two methods for determining microhardness. The dimensional effect impact on the values of microhardness derived from dynamic scratch testing and Vickers methods has been studied. The dimensional effect proves the dependence of hardness values on the applied load on the indenter, in particular, when the load decreases during indentation, the hardness values can either decrease or, quite the opposite, increase. One of the variations in the implementation of the scratch testing method is characterized by a gradually increasing load, resulting in a direct or reverse dimensional effect. The tests were carried out on a cold-formed copper strip with a thickness of 250 microns. In case of the scratch testing method, the loading range from 1 to 2 N and the method of applying the load were varied, and for microhardness control within Vickers method, a constant load of 2 N was applied. The dimensional effect impact on the results of microhardness changes was studied through additional tests of indentation prints using two types of optical microscopes at different magnifications. It is shown that with increasing indentation load, the microhardness of copper decreases monotonously, i.e. a direct dimensional effect is observed. According to the research results, it was determined that with increasing load, the average microhardness of HBS copper decreases monotonously by an average of 12,1 hPa for every 0,1 N, which is explained by a decrease in the size of the deformation zone with a decrease in the load on the indenter. A comparative analysis of the two methods for determining microhardness made it possible to determine advantageous characteristic differentials of the scratch testing over the classical Vickers method. Scratch testing is characterized by a significantly higher sensitivity to heterogeneity in the hardness and structure of the material under the same load and area of the test sample comparing to the Vickers method. The results of the study can be used to study the mechanical properties of materials and coatings, including properties characterized by anisotropy.

Keywords: dimensional effect, microhardness, scratch testing, Vickers method, microscopy, statistical analysis

Acknowledgments: The experimental studies were conducted using the equipment of the laboratory of the educational design center «Development, testing and reverse engineering of the electronic component base» and the laboratory of «Wave deformation and combined hardening in additive and subtractive technologies», BSTU.

For citation: Makarenko K.V., Kotlyarova I.A., Ilyushkin D.A., Zantsova E.A., Yatsenko A.E. Dimensional effect impact on microhardness measurement results through scratch testing and Vickers methods / Science intensive technology in mechanical engineering. 2026. № 2 (176). P. 3–12. doi: 10.30987/2223-4608-2026-2-3-12

Введение

Одной из базовых механических характеристик металлов, сплавов и покрытий, позволяющих оценить их качество, эксплуатационные и технологические свойства, является твердость, под которой понимают способность материала сопротивляться внедрению в него более твердого, упругодеформированного индентора [1]. Испытания на твердость являются неразрушающими, могут проводиться непосредственно на деталях и позволяют быстро оценить структурную и фазовую неоднородность сплава и покрытия (в том числе по

сечению), износостойкость, адгезионную прочность соединения покрытия с основанием.

Твердость покрытий и относительно тонких изделий, как правило, определяют микроиндентированием (ISO 14577) с величиной нагрузки на индентор от 2 Н и менее и глубиной внедрения индентора более 0,2 мкм [2].

С уменьшением толщины покрытия или изделия и полуфабрикатов точность традиционных методов исследования снижается из-за влияния подложки или опоры (например, предметного столика прибора) на определяемую величину твердости, особенно если глубина внедрения индентора превышает 10 % от

толщины покрытия или изделия [3, 4]. В связи с этим, в последние годы для определения твердости фольги, лент (толщиной от 0,1 до 6 мм) и покрытий применяют альтернативные методы. Например, скретч-тестирование, при котором в поверхность изучаемого материала вдавливаются индентор под действием нормально приложенной нагрузки с одновременным перемещением острия индентора вдоль тестируемой поверхности с заданной скоростью. При этом приложение нагрузки на индентор в процессе испытания может быть постоянным или она увеличивается от нуля до максимальных (требуемых) значений, или, наоборот, уменьшается. В результате на поверхности остается царапина, ширина которой связана с микротвердостью при скретч-тестировании HBS соотношениями, зависящими от формы индентора и величины нагрузки [5, 6].

В металловедении широко известен так называемый масштабный фактор, заключающийся в том, что результаты испытаний, проведенные на специально изготовленных образцах, отличаются от испытаний на реальных изделиях [7]. При определении микро- и нанотвердости также проявляется масштабный фактор [8]. Кроме того, при всех видах механических испытаний малых объемов материалов (в том числе, микротвердости тонких плоских изделий и покрытий) проявляется размерный эффект, именуемый в литературе масштабный эффект или фактор [10, 13] (Indentation Size Effect – ISE), т.е. свойства металлов и сплавов могут существенно отличаться от макроскопических свойств материала, обычно приводимых в инженерных справочниках [9].

Явление размерного эффекта при испытаниях твердости статическими методами исследовано достаточно подробно. Среди возможных причин размерного эффекта выделяют следующие: влияние внешних вибраций; наклеп образца при полировке и индентировании; увеличение относительной погрешности измерения размеров отпечатка с уменьшением нагрузки; влияние включений и границ; большая доля упругого восстановления для относительно маленьких отпечатков и прочее [10, 11]. Одним из ключевых факторов, определяющих размерный эффект, в работе [12] признают образование так называемых накатов типа

«pile-up», они представляю собой валики металла, образованные на периферии отпечатка индентора, в процессе локального пластического деформирования поверхностных слоев. Учитывая относительно малые размеры отпечатков индентора и ограничения оптических систем, используемых для определения их геометрических параметров, наблюдается непреднамеренное (обусловленное инструментальными ограничениями) уменьшение размеров диагоналей отпечатков, что, как следствие, приводит к увеличению показаний микротвердости. Для определения погрешности при замерах геометрических параметров отпечатков индентора в настоящей работе предложено использовать несколько типов оптических микроскопов с разными схемами построения увеличенных изображений.

Исследования размерного эффекта при определении микротвердости материалов методом царапания весьма ограничены [9, 13], хотя скретч-тестирование традиционно используется для определения микротвердости тонких покрытий [3], а также поверхности металлических сплавов. Так как в основе большинства исследований методом скретч-тестирования происходит постепенное увеличение нагрузки в процессе царапания, то изучение размерного эффекта для данного метода является безусловно актуальным.

Цель работы: оценить влияние размерного эффекта при измерениях геометрических размеров отпечатков индентора на разных микроскопах на значения параметров динамической и статической микротвердости, определяемой методом скретч-тестирования и Виккерса.

Материалы и методы

В работе изучали проявление размерного эффекта при определении микротвердости в процессе микроиндентирования металлических и полимерных материалов на установке SMT-5000, позволяющей индентировать материалы с непрерывно фиксирующейся постоянной или переменной (линейно-увеличивающейся) нагрузкой. Принципиальная схема установки представлена на рис. 1.

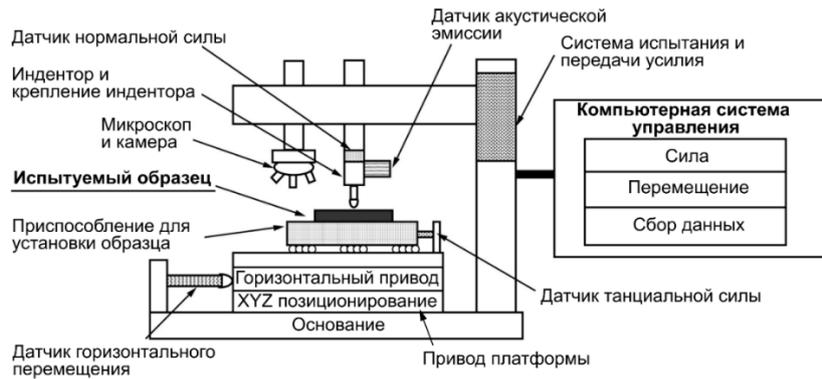


Рис. 1. Принципиальная схема установки для скретч-тестирования

Fig. 1. Schematic diagram of the installation for scratch testing

Высокоточный модуль микроиндентирования установки SMT-5000 позволяет установить влияние на микротвердость тонких покрытий и поверхностных слоев материалов технологии их получения, оценить анизотропию свойств покрытия, равномерность структуры по площади образца.

Исследовали влияние размерного эффекта на HB_s на холоднодеформированной ленте толщиной 250 мкм (ГОСТ 1173-2006) из меди марки М1 (ГОСТ 859-2014). В качестве эталонного монолитного материала при скретч-тестировании использовали поликарбонат.

Скретч-тестирование проводили с использованием конического индентора Роквелла с углом при вершине 120° и радиусом закругления 200 мкм. Путь перемещения индентора (длина царапины) вдоль поверхности образца 1 мм, скорость перемещения индентора 10 мм/с, приложенная нагрузка F_z варьировалась от 1 до 2 Н с шагом 0,25.

Каждый образец при заданной величине нагружения царапали пять раз при идентичных параметрах для обеспечения воспроизводимости результатов (в каждой области царапины проводили на расстоянии 0,25 мм с возрастающей нагрузкой). Царапание проводили с пред- и постсканированием области исследования поверхности образцов. В процессе предсканирования индентор сканирует поверхность с минимальной нагрузкой ($\approx 0,1$ Н); в дальнейшем это позволяет определять истинную глубину внедрения индентора. При постсканировании также профиль поверхности сканируется с

минимальной нагрузкой, что в свою очередь, позволяет оценить остаточную глубину царапины.

Во время испытания регистрировали истинную глубину внедрения индентора PD (penetration depth – разница в глубине между глубиной проникновения индентора в материал во время скретч-теста и профилем поверхности, измеренном при предсканировании) и глубину после снятия нагрузки RD (residual depth – остаточная глубина царапины) (рис. 2).

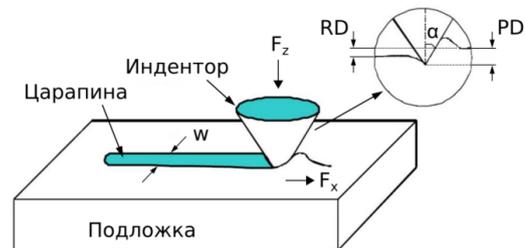


Рис. 2. Схема взаимодействия индентора с поверхностью образца при скретч-тестировании

Fig. 2. Diagram of the interaction of the indenter with the sample surface during scratch testing

Ширину (w) полученных царапин (усредненное по 10-ти измерениям расстояние между вершинами навалов, ограничивающих царапину с обеих сторон, первоначально измеряли с помощью цифрового оптического микроскопа (при увеличении, $\times 20$) и рассчитывали микротвердость при скретч-тестировании HB_s по формуле [14]

$$HB_s = \frac{4P}{\pi w^2}, \quad (1)$$

где P – приложенная нагрузка, Н; w – ширина царапины, м.

Определение микротвердости по методу Виккерса проводили на приборе KB 30S при нагрузке 1 Н в соответствии с ГОСТ 2999-75.

Пробоподготовка исследуемых образцов медной холоднодеформированной ленты в виде шлифования, полирования и травления не проводилась.

Дополнительные замеры геометрических параметров (w при скретч-тестировании и d при определении микротвердости методом Виккерса) проводили на двух оптических микроскопах Leica DVM6A и Leica DM IRM при разных увеличениях. На инвертированном металлографическом микроскопе Leica DM IRM для определения размеров использовали специализированное ПО SIAMS 800. При этом изображение царапин при увеличении $\times 200$ получали и анализировали на инвертированном микроскопе Leica DM IRM, а увеличение $\times 750$ на прямом микроскопе Leica DVM6A.

Для выявления статистически значимых различий параметров скретч-тестирования

применяли статистический метод обработки полученных результатов, в ходе которого были определены коэффициенты вариации (CV) по формуле [15]

$$CV = \frac{\sigma}{\mu}, \quad (2)$$

где σ – стандартное отклонение; μ – среднее значение. Чем выше значение коэффициента вариации, тем больше разброс данных измерения микротвердости относительно среднего ее значения, что является признаком большей степени неопределённости в данных измерения твердости.

Результаты и их обсуждение

Пример типичной фотографии царапины, а также диаграммы параметров скретч-тестирования с результатами определения величин истинной PD и остаточной RD глубины внедрения индентора, полученные на установке SMT-5000, при увеличении $\times 20$ представлен на рис. 3.

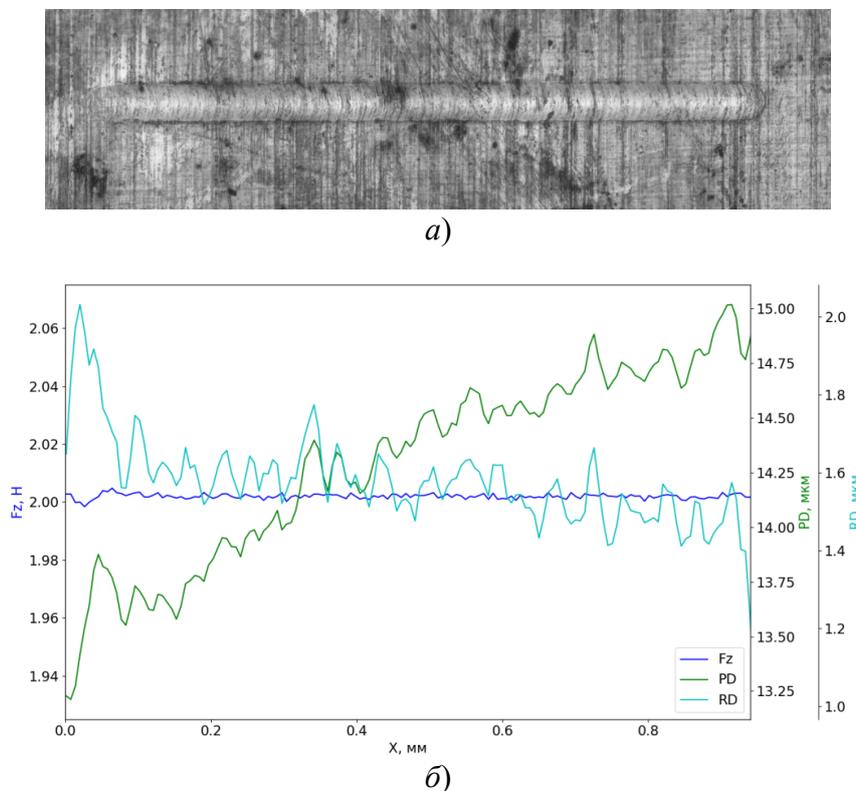


Рис. 3. Внешний вид царапины, $\times 20$ (а); непрерывно фиксируемые значения PD и RD для меди с нагрузкой на индентор $F_z = 2$ Н (б)

Fig. 3. Scratch appearance from the outside, $\times 20$ (a); continuously fixed PD and RD values for copper with indenter load $F_z = 2$ N (b)

При оценке микротвердости, в особенности микротвердости тонких покрытий или поверхностных слоев, это обеспечивает точный контроль глубины внедрения индентора за счет автоматически фиксируемых значений PD и RD , что позволяет исключить влияние подложки или более глубоко расположенных слоев материала на измеряемые значения микротвердости HB_S , а также при

необходимости позволяет измерять микротвердость на заданной глубине.

Обобщенные зависимости микротвердости HB_S от приложенной на индентор нагрузки F_Z представлены на рис. 4. Блоки и точки на графике – результат обработки 50 индивидуальных измерений, штриховые линии соединяют медианы значений микротвердости при соответствующей нагрузке.

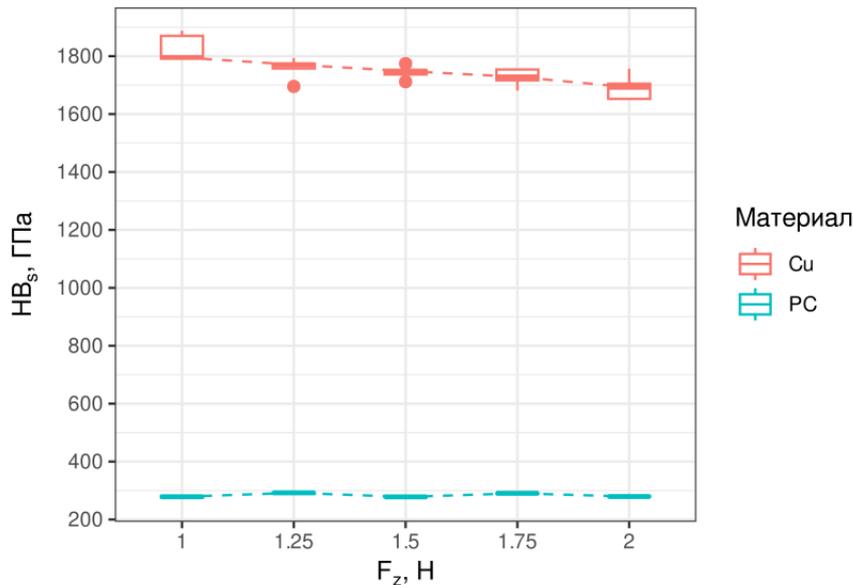


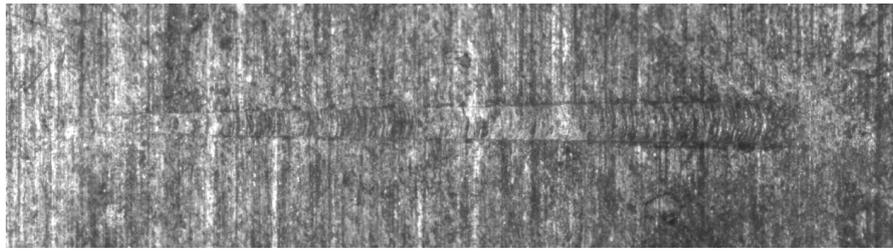
Рис. 4. Зависимости микротвердости HB_S меди (Cu) и поликарбоната (PC) от нормальной нагрузки F_z

Fig. 4. Dependences of HB_S microhardness of copper (Cu) and polycarbonate (PC) on normal load F_z

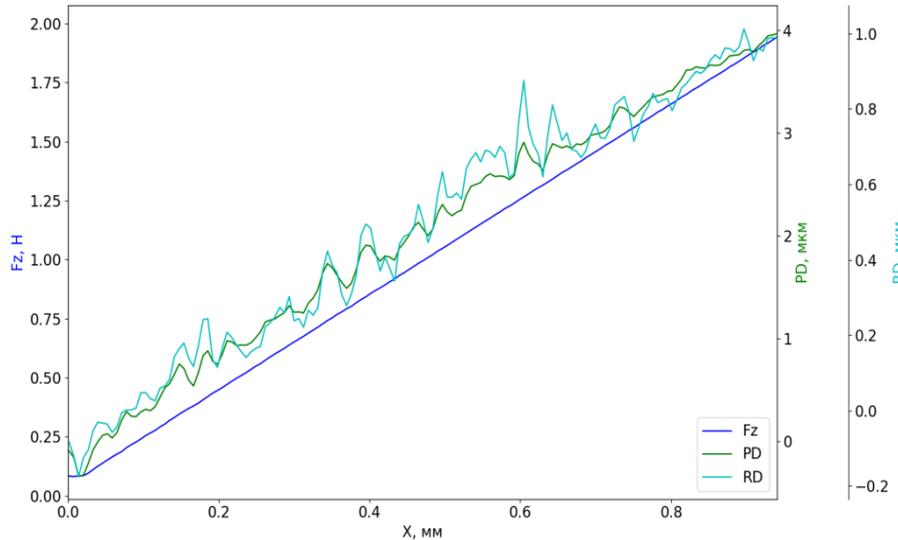
Полученные результаты подтверждают отсутствие размерного эффекта у поликарбоната: значения микротвердости не зависят от величины нагрузки на индентор, т.е. применяемые в работе методика эксперимента и обработка первичных данных приводят к корректным результатам; это дает основание считать последующие измерения микротвердости, в частности, меди, адекватными.

Для медной ленты ожидаемо наблюдается прямой размерный эффект (рис. 4). Так, с увеличением нагрузки средняя микротвердость HB_S меди монотонно уменьшается в среднем на 12,1 ГПа на каждые 0,1 Н, что

очевидно связано с уменьшением размера зоны деформирования при уменьшении нагрузки на индентор. Таким образом, значения микротвердости HB_S , рассчитанные в диапазоне нагрузок от 1 до 2 Н, для меди и других размерно-зависимых материалов несопоставимы. В этом случае для сравнительной оценки микротвердости необходимо подбирать постоянную нагрузку на индентор таким образом, чтобы образующиеся царапины имели одинаковую ширину. Для выбора подходящей нагрузки целесообразно проводить скретч-тестирование с линейно возрастающей нагрузкой (рис. 5).



а)



б)

Рис. 5. Внешний вид царапины, $\times 20$ (а); непрерывно фиксируемые значения PD и RD для меди с нагрузкой на индентор $F_z = 0,1 \dots 2,0$ Н (б)

Fig. 5. Scratch appearance from the outside, $\times 20$ (a); continuously fixed PD and RD values for copper with indenter load $F_z = 0,1 \dots 2,0$ N (b)

Результаты измерений микротвердости медной ленты при нормальной нагрузке на индентор $F_z = 2$ Н по методу Виккерса $HV_{0,2}$ и при скретч-тестировании HB_S (с оценкой ширины царапин на разных увеличениях) приведены на рис. 6. Значения коэффициентов вариации, а также функции плотности вероятности показывают, что скретч-тестирование отличается значительно более высокой чувствительностью к неоднородности значений твердости и структуры материала при той же нагрузке и площади образца для проведения испытаний.

Метод Виккерса, как известно, позволяет производить оценку микротвердости отдельных структурных составляющих сплавов. Измерения по заранее определенной сетке позволяют автоматизировать процесс на

твердомере КВ 30S и сократить время испытаний. Параметры сетки определяются с учетом минимального расстояния между отпечатками для соответствующей нагрузки, которое регламентируется ГОСТ 2999-75, что накладывает определенные ограничения в условиях, когда измерения необходимо выполнить на небольших площадках.

Тем не менее следует отметить, что испытания в автоматическом режиме весьма удобны не только из-за высокой производительности. Поставленные таким образом измерения обеспечивают репрезентативность выборочных данных, что снижает субъективность оценки микротвердости по площади и дает статистически достоверные результаты.

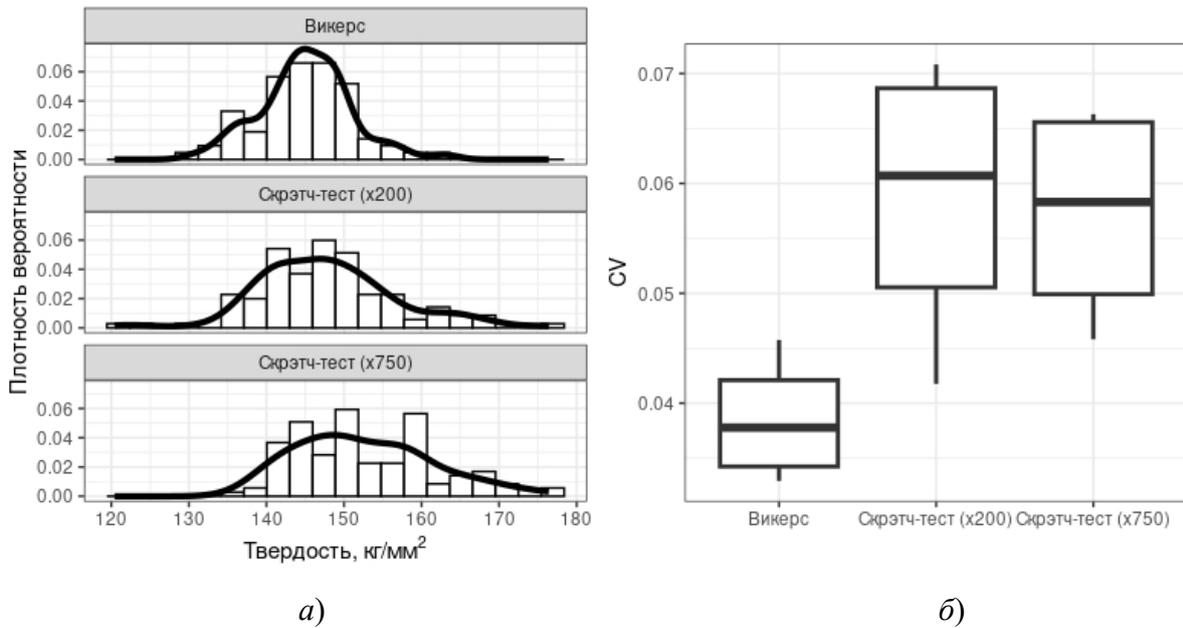


Рис. 6. Распределение микротвердости (а) и коэффициент вариации CV (б) в зависимости от метода измерения

Fig. 6. Microhardness distribution (a) and coefficient of variation CV (b) depending on the measuring technique

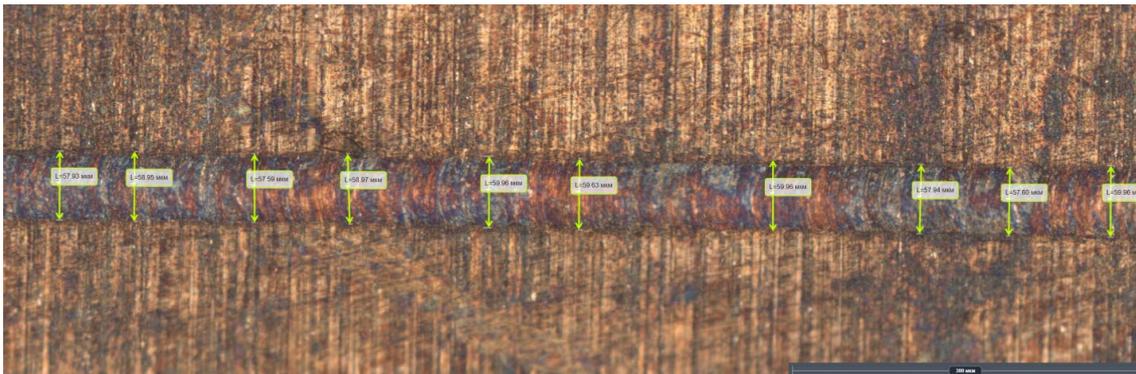


Рис. 7. Царапина на медной ленте и замеры ее ширины в 10-ти местах, $\times 200$

Fig. 7. A scratch on a copper strip and measurements of its width in 10 places, $\times 200$

При скретч-тестировании царапины заданной длины измеряют как минимум в 10 местах (рис. 7), не обращая внимания на локальные неоднородности структуры. В этой связи наблюдается повышение коэффициента вариации независимо от увеличения изображения при измерении ширины царапин, что очевидно связано с увеличением дисперсии на каждой из площадок, где проводились измерения. Указанная особенность проведения и обработки результатов скретч-тестирования является несомненным преимуществом метода. В частности, для материалов с анизотропным

рельефом поверхности, например, для гальванически осажденных покрытий, у которых кристаллы ориентированы своими осями определенным образом относительно подложки, микротвердость царапанием будет отражать разницу вдоль и поперек направления ориентации кристаллов.

Таким образом, выбор метода измерения микротвердости должен быть обоснован с учетом целей исследования, размеров и конфигурации образцов, нагрузки и структуры материала.

Заключение

1. Метод скретч-тестирования при оценке микротвердости тонких покрытий или поверхностных слоев материалов, обеспечивает более точный контроль глубины внедрения индентора за счет автоматически фиксируемых значений PD и RD . Это позволяет исключить влияние подложки или более глубоко расположенных слоев материала на определяемые значения микротвердости HB_s , а также при необходимости позволяет измерять микротвердость на заданной глубине.

2. Для медной ленты при скретч-тестировании наблюдается прямой размерный эффект. В частности, в ходе исследований было определено, что с увеличением нагрузки средняя микротвердость HB_s меди монотонно уменьшается в среднем на 12,1 ГПа на каждые 0,1 Н, что связано с уменьшением размера зоны деформирования при уменьшении нагрузки на индентор.

3. Анализ коэффициентов вариации, а также функции плотности вероятности определенных для методов скретч-тестирования и Виккерса показывают, что скретч-тестирование отличается значительно более высокой чувствительностью к неоднородности значений твердости и структуры материала при той же нагрузке и площади образца для проведения испытаний, чем метод Виккерса.

4. Метод скретч-тестирования в сравнении с классическим методом определения микротвердости Виккерса обладает существенным преимуществом особенно для материалов с анизотропным рельефом поверхности, например, для покрытий, у которых кристаллы ориентированы своими осями определенным образом относительно подложки. При этом микротвердость царапанием будет отражать разницу вдоль и поперек направления ориентации кристаллов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Орешко Е.И., Уткин В.С., Ерасов В.С., Ляхов А.А. Методы измерения твердости материалов // Труды ВИАМ. 2020. № 1 (85). С. 101–117. DOI 10.18577/2307-6046-2020-0-1-101-117.

2. Дик И.И. Методы определения твердости металлов и сплавов // Сб. науч. тр. VI Всероссийской научно-практической конференции. Кинель, 2023. С. 94–97.

3. Кирюханцев-Корнеев Ф.В. Особенности измерения твердости тонких функциональных покрытий методами склерометрии, микро- и наноиндентирования // Физикохимия поверхности и защита материалов. 2018. Т. 54. № 5. С. 514–520. DOI 10.1134/S0044185618050121.

4. Шайхетдинов Р.С., Давыдов А.В., Шайхетдинова Р.С., Бронская В.В. Совершенствование методов определения твердости // Актуальные проблемы общества, экономики и права в контексте глобальных вызовов: Сб. материалов XXII Международной научно-практической конференции. Санкт-Петербург. 2023. С. 272–275.

5. Мощенок В.И., Батыгин Ю.В. Размерный эффект в определении твердости материалов // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. 2010. № 48. С. 194–199. EDN MVOVWJ.

6. Белов В.К., Губарев Е.В., Кривко О.В., Папшев А.В., Гофман Н.Г., Самородова Э.Г. Определение адгезионных характеристик покрытий с использованием современного скретч теста. Ч. 1. Возможности использования современного скретч теста для определения адгезионных свойств покрытий // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2020. Т. 76. № 2. С. 143–153. DOI: 10.32339/0135-5910-2020-2-143-152.

7. Кондратьев С.Ю., Ермаков Б.С., Швецов О.В., Гельфгат М.Я. Влияние масштабного фактора на циклическую прочность бурильных труб из алюминиевого сплава Д16Т и стали группы прочности G-105 // Материаловедение и термическая обработка металлов. 2025. № 2. С. 64–70. DOI: 10.30906/mitom.2025.2.64-70.

8. Матюшин В.М., Марченков А.Ю., Абусаиф Н., Стасенко Н.А. Определение и сравнение микротвердости упрочняющих покрытий // Технология металлов. 2018. № 11. С. 30–32. DOI: 10.31044/1684-2499-2018-11-30-32.

9. Головин Ю.И., Тюрин А.И., Асланян Э.Г., Пирожкова Т.С., Васюков В.М. Физико-механические свойства и микромеханизмы локального деформирования материала с различной зависимостью твердости от глубины отпечатка // Физика твердого тела. 2017. Т. 59. С. 1778–1786.

10. Матюшин В.М. Общие закономерности проявления масштабного фактора при определении прочности и твердости металла // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2010. № 8. С. 43–47.

11. Udalov A.V. Indentation size effect and hardness of materials // E3S Web of Conferences; ITSE-2023. October 2023. 431(5-6):06025. DOI:10.1051/e3sconf/202343106025.

12. Федосов С.А. Определение механических свойств материалов микроиндентированием: Современные зарубежные методики М.: Физический факультет МГУ. 2004. 100 с.

13. Марченков А.Ю. Масштабный эффект при испытаниях царапанием материалов с разным

деформируемым объемом // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2017. Т. 83. № 9. С. 66–69.

14. ASM Handbook: V. 18. Friction, lubrication, and wear technology // ASM International. Handbook Committee, 1990. 1879 p. ISBN 0-87170-380-7.

15. **International Encyclopedia of Statistical Science** / Ed.: Miodrag Lovric. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag. 2025. 2917 p.

REFERENCES

1. Oreshko E.I., Utkin V.S., Yerasov V.S., Lyakhov A.A. Methods of measurement of hardness of materials // Proceedings of VIAM. 2020, no. 1 (85), pp. 101–117. DOI 10.18577/2307-6046-2020-0-1-101-117.

2. Dik I.I. Methods for determining the hardness of metals and alloys // Proceedings of the VI-th All-Russian Scientific and Practical Conference. Kinel, 2023, pp. 94–97.

3. Kiryukhantsev-Korneev F.V. Specificity of measurements of the hardness of thin functional coatings using sclerometry, micro- and nanoindentation methods // Physical chemistry of the surface and protection of materials, 2018, vol. 54, no. 5, pp. 514–520. DOI 10.1134/S0044185618050121.

4. Shaikhetdinov R.S., Davydov A.V., Shaikhetdinova R.S., Bronskaya V.V. Improving methods for determining hardness // Actual problems of society, economics and law in the context of global challenges: Proceedings of the XXII-th International Scientific and Practical Conference. Saint Petersburg. 2023, pp. 272–275.

5. Moshenok V.I., Batygin Yu.V. The dimensional effect in determining the hardness of materials // Bulletin of the Kharkiv National Automobile and Road University. 2010, no. 48, pp. 194–199. EDN MVOVWJ

6. Belov V.K., Gubarev E.V., Krivko O.V., Papshev A.V., Goffman N.G., Samorodova E.G. Determination of adhesive characteristics of coatings using a modern scratch test. Part 1. Possibilities of using a modern scratch test to determine the adhesive properties of coatings //

Ferrous Metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information. 2020, vol. 76, no. 2, pp. 143–153. DOI: 10.32339/0135-5910-2020-2-143-152.

7. Kondratiev S.Yu., Ermakov B.S., Shvetsov O.V., Gelfgat M.Ya. The effect of the scale factor on fatigue characteristics and failure mechanisms of drill pipes from aluminum alloy D16T and steel G-105 // Metal science and heat treatment of metals. 2025, no. 2, pp. 64–70. DOI: 10.30906/mitom.2025.2.64-70.

8. Matyushin V.M., Marchenkov A.Yu., Abusaif N., Stasenko N.A. Determination and comparison of microhardness of harden coatings. 2018, no. 11, pp. 30–32. DOI: 10.31044/1684-2499-2018-11-30-32.

9. Golovin Yu.I., Tyurin A.I., Aslanyan E.G., Pirozhkova T.S., Vasyukov V.M. The physical and mechanical properties and local deformation micromechanisms in materials with different dependence of hardness on the depth of print // Physics of the Solid State. 2017, vol. 59, pp. 1778–1786.

10. Matyunin V.M. Scale factor in determining the hardness of metal materials // Industrial laboratory. Diagnostics of materials. 2010, no. 8, pp. 43–47.

11. Udalov A.V. Indentation size effect and hardness of materials // E3S Web of Conferences; ITSE-2023. October 2023. 431:06025. DOI:10.1051/e3sconf/202343106025

12. Fedosov S.A. Determination of mechanical properties of materials by microindentation: Modern foreign methods, Moscow: Faculty of Physics, Moscow State University, 2004. 100 p.

13. Marchenkov A.Y. Large-scale effect during scratching tests of materials with different deformable volumes // Industrial laboratory. Diagnostics of materials. 2017, vol. 83, no. 9, pp. 66–69.

14. ASM Handbook: V. 18. Friction, lubrication, and wear technology // ASM International. Handbook Committee, 1990. 1879 p. ISBN 0-87170-380-7.

15. **International Encyclopedia of Statistical Science** / Ed.: Miodrag Lovric. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag. 2025. 2917 p.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 17.07.2025; одобрена после рецензирования 17.09.2025; принята к публикации 22.09.2025.

The article was submitted 17.07.2025; approved after reviewing 17.09.2025; assepted for publication 22.09.2025.