

УДК 621.01, 539.422.5

Экспериментальное исследование механических свойств материалов конструкционного назначения методом наноиндентирования

Ю.В. Корнев¹, Р.Ф. Гилязова¹, М.В. Мурашов²

¹ ФГБУН Институт прикладной механики РАН

² МГТУ им. Н.Э. Баумана

Experimental study of mechanical properties of structural materials applying nanoindentation method

Yu.V. Kornev¹, R.F. Gilyazova¹, M.V. Murashov²

¹ Institute of Applied Mechanics of the Russian Academy of Sciences

² Bauman Moscow State Technical University

Выбраны материалы для проведения сравнительных экспериментов методом наноиндентирования. Эти материалы, широко применяемые в аэрокосмической отрасли, представляют интерес с точки зрения экспериментальной оценки механических свойств различными методами с целью дальнейшего моделирования и прогнозирования свойств изделий из материалов такого класса. Исследованы следующие материалы: сталь 12X18H10T, углерод-углеродный композиционный материал со стержневым каркасом и пироуглеродной матрицей, со срезом в направлении оси z (УУКМ-С) и углерод-углеродный композиционный материал с иглопробивным каркасом и пироуглеродной матрицей, со срезом в направлении пробития по оси z (УУКМ-И). Также исследованы элементы структуры композитных материалов (стержень и матрица). Установлено, что степень шероховатости поверхности существенно влияет на свойства материалов, испытанных методом наноиндентирования. Увеличение максимальной нагрузки до 200 мН и выбор сфероконического индентора позволяют существенно снизить влияние шероховатости поверхности на механические свойства образцов стали и углерод-углеродных композитов. Для всех образцов композиционных материалов получены кривые ползучести при наноиндентировании со ступеньками, указывающими на начало процессов разрушения/трещинообразования. Однако эта особенность оказалась нехарактерной для стержня УУКМ-С при малой нагрузке (50 мН) и для образца УУКМ-И: для них получены типичные кривые ползучести.

EDN: ARXTRL, <https://elibrary/arxtrl>

Ключевые слова: материалы конструкционного назначения, углерод-углеродные композиционные материалы, метод наноиндентирования, приведенный модуль упругости, ползучесть при наноиндентировании

In the given work, several materials were selected for comparative experiments applying the nanoindentation method. These materials are widely used in the aerospace industry and are of interest from the point of view of experimental evaluation of mechanical properties by various methods for the purpose of further modeling and forecasting the properties of products made of this class of materials. The following materials were studied: 12X18H10T steel, carbon-carbon composite material with a rod frame and a pyrocarbon matrix, with a cut in the z -axis direction (UUKM-S), carbon-carbon composite material with a needle-punched frame and a pyrocarbon matrix, with a cut in the punching direction along the

z-axis (UUKM-I). During the work, the structural elements of the composites (rod and matrix) were also studied. It was found that the degree of surface roughness significantly affects the properties of the materials tested by the nanoindentation method. At the same time, increasing the maximum load to 200 mN and choosing a spherical conical indenter allows us to significantly reduce the effect of surface roughness on the obtained mechanical properties of steel and carbon-carbon composite samples. For all the composite samples studied, creep curves were obtained during nanoindentation with steps indicating the onset of destruction/cracking processes. However, this effect is not typical for the rod (UUKM-S) at a low load (50 mN) and for the composite sample with a needle-punched frame (UUKM-I), for which typical creep curves were obtained.

EDN: ARXTRL, <https://elibrary/arxtrl>

Keywords: structural materials, carbon-carbon composites, nanoindentation method, reduced modulus of elasticity, creep at nanoindentation

Испытание индентированием — относительно простой метод, заключающийся в контакте исследуемого материала, механические свойства которого (модуль упругости, твердость и др.) необходимо определить, с другим материалом (индентором) с известными свойствами. Наноиндентирование — испытание на вдавливание, при котором глубина внедрения (индентирования) измеряется в нанометрах [1, 2]. Следует отметить, что идея перехода от измерения остаточных размеров отпечатка, возникающего под действием известной силы, приложенной к инструменту, к непрерывной регистрации кривой нагрузка — глубина внедрения [3], как и первые шаги ее развития [4–6], принадлежат советским ученым.

Метод индентирования можно использовать для расчета не только твердости материала, но и модуля упругости, показателя деформационного упрочнения, вязкости разрушения (ударной вязкости), трещиностойкости (для хрупких материалов), вязкоупругих свойств и др. [1, 2, 7–10]. Таким образом, можно определить достаточно много различных свойств широкого спектра материалов путем эксперимента по индентированию, который является неразрушающим методом испытаний.

В последние годы благодаря высокой разрешающей способности и универсальности метод наноиндентирования быстро развивается и широко применяется для определения упруго-пластических свойств и твердости металлов, керамики и композиционных материалов (КМ) [10–14].

Кроме того, при исследовании механических свойств материалов важно оценивать их вязкоупругие и вязкопластические свойства, также известные как реологические. Обычно эти свойства изучают в экспериментах по опреде-

лению ползучести [15, 16]. Реакция материала при исследовании ползучести связана с такими факторами, как температура, скорость нагружения, время, пиковая нагрузка, упругие свойства, средний размер зерна и др. [17].

Метод наноиндентирования применяют и для анализа вязкоупругого поведения материала путем измерения глубины индентирования как функции времени, что позволяет оценить его ползучесть [18–21]. Существуют три стадии ползучести: начальная (переходная), установившаяся и ускоренная [15, 16]. В экспериментах по наноиндентированию удалось оценить две стадии ползучести: начальную и установившуюся [19].

В качестве основного международного стандарта при испытании материалов методом наноиндентирования применяют ISO 14577, который включает в себя также методы и режимы испытаний, калибровки приборов и методы обработки данных.

Цель работы — исследование влияния параметра шероховатости поверхности на свойства материалов в экспериментах по наноиндентированию.

В качестве объектов исследования выступали следующие материалы:

- сталь 12X18H10T (два образца);
- углерод-углеродный КМ со стержневым каркасом и пироуглеродной матрицей, со срезом в направлении оси z (УУКМ-С);
- углерод-углеродный КМ с иглопробивным каркасом и пироуглеродной матрицей, со срезом в направлении пробития по оси z (УУКМ-И).

Образцы выполняли в виде цилиндров диаметром 10...15 мм и высотой до 5 мм. Поверхность образцов отшлифовывали. Так как параметры шероховатости поверхности образцов различались, их фиксировали перед экспериментом по наноиндентированию. Для получения

изображений поверхности образцов использовали оптический микроскоп Альтами MET 5T с увеличением до $\times 2500$. Измерения шероховатости поверхности проводили с применением стилусного профилометра Alpha-Step IQ.

Эксперимент по наноиндентированию выполняли на приборе NanoTest 600 согласно ISO 14577. Образец материала закрепляли на специальной подложке с помощью клея и подводили к индентору. Индентирование каждого образца проводили в шести точках на расстоянии 60 мкм друг от друга. Нагрузку увеличивали с постоянной скоростью до достижения заданного максимального значения ($P = 50, 100$ и 200 мН).

Скорость индентирования устанавливали в соответствии с максимальной нагрузкой из расчета, что цикл нагружения должен занимать 20 с (например, для максимальной нагрузки $P = 100$ мН скорость индентирования составляла 5 мН/с). Для образцов КМ скорость индентирования снижали до 1 мН/с при $P = 50$ мН и до 2 мН/с при $P = 100$ мН с целью более точного выявления начала деструкции/образования трещин. Затем максимальную нагрузку фиксировали на 100 с и контролировали крип-эффект, т. е. при фиксированной (постоянной) нагрузке происходило определение возможного дальнейшего увеличения глубины индентирования, что характеризует ползучесть материала.

Разгрузку выполняли с той же скоростью, что и нагружение. На стадии разгрузки также контролировали температурный дрейф путем фиксирования индентора в процессе разгрузки (при 80 % разгрузки) на 60 с и определения возможного смещения. Полученные экспериментальные данные приведены с учетом возможного температурного дрейфа и крип-

эффекта. Таким образом, в ходе эксперимента удалось точнее выделить упругую составляющую при разгрузке (упругий отклик материала) и определить приведенный модуль упругости материала.

Применяли сфероконический алмазный индентор с углом при вершине 60° и радиусом закругления 10 мкм. Такой индентор является сферическим в вершине, но имеет переходную секцию, которая не является ни частью сферы, ни частью конуса (рис. 1).

Индентирование проводили в режиме контролируемой нагрузки с преднагрузкой 0,01 мН. На стадиях нагрузки и разгрузки снимали зависимости нагрузка — глубина индентирования.

Для обработки экспериментальных данных использовали метод Герца, применяя выражение

$$P = \frac{3}{4} E_r R_t^{\frac{1}{2}} h_e^{\frac{3}{2}}. \quad (1)$$

Здесь P — нагрузка; E_r — приведенный модуль упругости; R_t — радиус индентора; h_e — глубина внедрения индентора в материал,

$$h_e = h_t = \frac{a^2}{R_t}, \quad (2)$$

где a — радиус контакта.

Соотношение (2) для твердого сферического индентора показывает, что упругая деформация материала до и под плоскостью контакта с материалом одинаковая, и ее можно выразить через радиус сферы индентора R_t и радиус контакта a следующим образом:

$$\frac{P}{\pi a^2} = \frac{4}{3\pi} E_r \left(\frac{a}{R_t} \right). \quad (3)$$

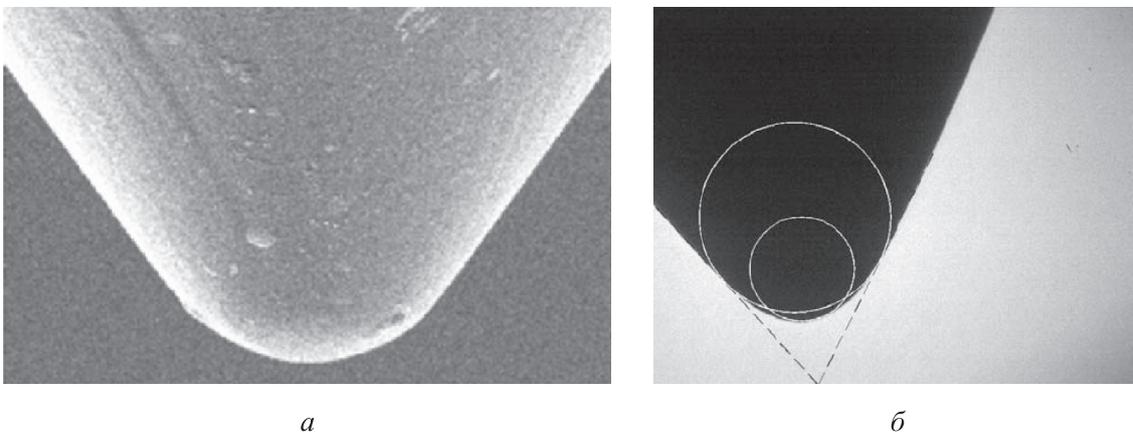


Рис. 1. Сфероконический индентор:
а — внешний вид, полученный путем электронной микроскопии; б — схема

Таким образом, в формуле (1) можно соотнести нагрузку и глубину внедрения при индентировании и выразить через радиусы контакта и сферы индентора (3).

Дальнейшее развитие метода Герца — multiple-point unload method (многоточечный метод на основе соотношений Герца). При таком методе обработки оценивают кривую разгрузки, полученную при наноиндентировании сферическим индентором, в ее начальной части

$$\frac{dP}{dh} = 2E_r R^{\frac{1}{2}} h_e^{\frac{1}{2}}. \quad (4)$$

Из соотношения (4) можно выразить и рассчитать приведенный модуль упругости исследуемого материала, используя программное обеспечение измерительного комплекса NanoTest 600 в автоматическом режиме.

В то же время из контактной механики известно следующее соотношение:

$$\frac{1}{E_r} = \frac{1-\nu_s^2}{E_s} + \frac{1-\nu_i^2}{E_i}, \quad (5)$$

где ν_s и E_s — коэффициент Пуассона и модуль упругости образца; ν_i и E_i — коэффициент Пуассона и модуль упругости индентора, для алмазного индентора измерительного комплекса NanoTest 600 $\nu_i = 0,07$, $E_i = 1141$ ГПа.

Таким образом, с помощью соотношения (5) можно рассчитать модуль упругости образца.

Все образцы имели значительную шероховатость поверхности. Минимальные значения параметра шероховатости получены для образца стали № 1, где максимальный перепад высот составлял около 1 мкм ($R_a = 0,1$ мкм, $R_t = 1,5$ мкм), а максимальные — для образца

УУКМ-И, где максимальный перепад высот составлял более 10 мкм ($R_a = 1,6$ мкм, $R_t = 17,8$ мкм).

Результаты обработки данных экспериментов по наноиндентированию приведены на рис. 2. Видно, что увеличение нагрузки при наноиндентировании ведет к снижению разброса (коэффициента вариации) полученных показателей.

Несколько меньшие значения приведенного модуля упругости связаны с достаточно высокой шероховатостью поверхности. Более глубокое внедрение (при $P = 200$ мН) дает более адекватную оценку свойств образцов стали. Например, получен приведенный модуль упругости около 250 ГПа. Следует отметить и высокие значения относительного гистерезиса при наноиндентировании образцов стали: у первого образца они доходили до 0,91, у второго — до 0,93, что свидетельствует об их достаточно высокой пластичности.

Экспериментальные данные по исследованию крип-эффекта после наноиндентирования при нагрузке $P = 50$ и 200 мН приведены на рис. 3.

Результаты обработки полученных типичных кривых ползучести испытуемых образцов стали приведены в таблице.

Для КМ УУКМ-С локально исследовали свойства элементов его структуры: матрицы, стержня и сечения.

Результаты обработки экспериментальных данных приведены на рис. 4. Видно, что увеличение нагрузки при наноиндентировании для образцов КМ не всегда ведет к снижению разброса полученных показателей, как у образцов стали. Это справедливо при исследовании мат-

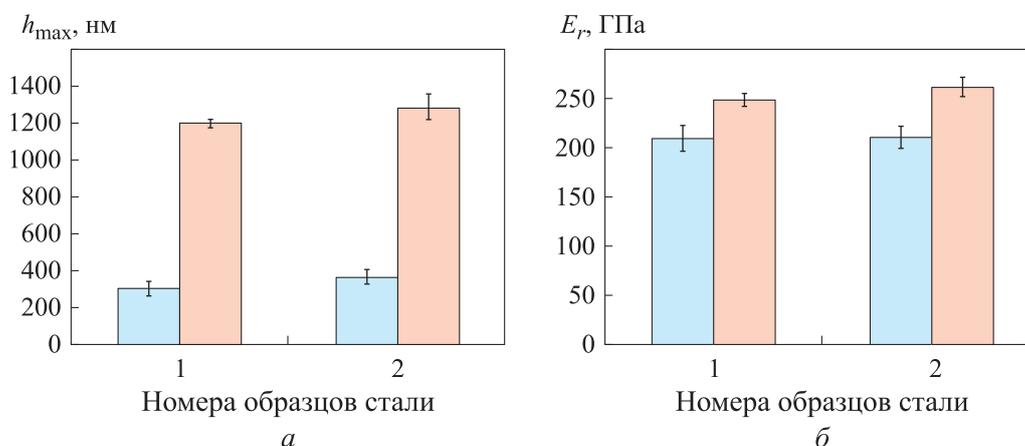


Рис. 2. Значения максимальной глубины индентирования h_{\max} (а) и приведенного модуля упругости E_r (б) образцов стали при нагрузке $P = 50$ (■) и 200 мН (■)

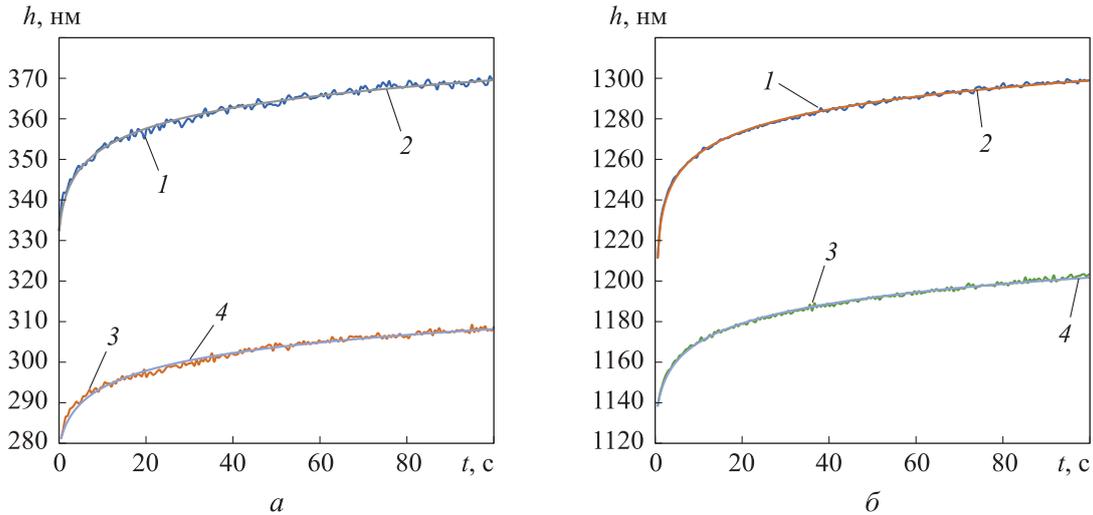


Рис. 3. Экспериментальные (1, 3) и аппроксимирующие (2, 4) зависимости глубины индентирования h образцов стали № 2 (1, 2) и № 1 (3, 4) от времени t при нагрузке $P = 50$ (а) и 200 мН (б)

рицы образца УУКМ-С, но при исследовании его стержня, разброс полученных показателей (в том числе и при определении модуля упругости) возрастает. Возможно, это связано с тем, что стержень более хрупкий элемент структуры КМ по сравнению с матрицей. Это подтверждают кривые индентирования, где на стадии нагрузки отмечались характерные скачки. Показано, что характеристики сечения образца УУКМ-С близки к характеристикам его матрицы.

Из рис. 4 также видно, что характеристики образца УУКМ-И близки к характеристикам матрицы образца УУКМ-С.

Экспериментальные данные по исследованию крип-эффекта после наноиндентирования образцов КМ при нагрузке $P = 50$ и 100 мН приведены на рис. 5, а-е.

Для всех образцов КМ получены кривые ползучести с характерными ступеньками, которые свидетельствуют о начале процессов разрушения/трещинообразования в КМ. Однако это нехарактерно для стержня образца УУКМ-С № 5 при нагрузке $P = 50$ мН и для образца УУКМ-И № 7: они имеют типичные кривые ползучести (см. рис. 5, в).

Кривые ползучести всех образцов обрабатывали с помощью функции

$$dh = A \ln(Bt + 1). \tag{6}$$

Для всех кривых ползучести найдены коэффициенты A и B уравнения (6), (см. таблицу), что позволило количественно сравнить результаты эксперимента и аппроксимации. Аппроксимирующие кривые приведены на рис. 3 и 5 наряду с осредненными данными эксперимента.

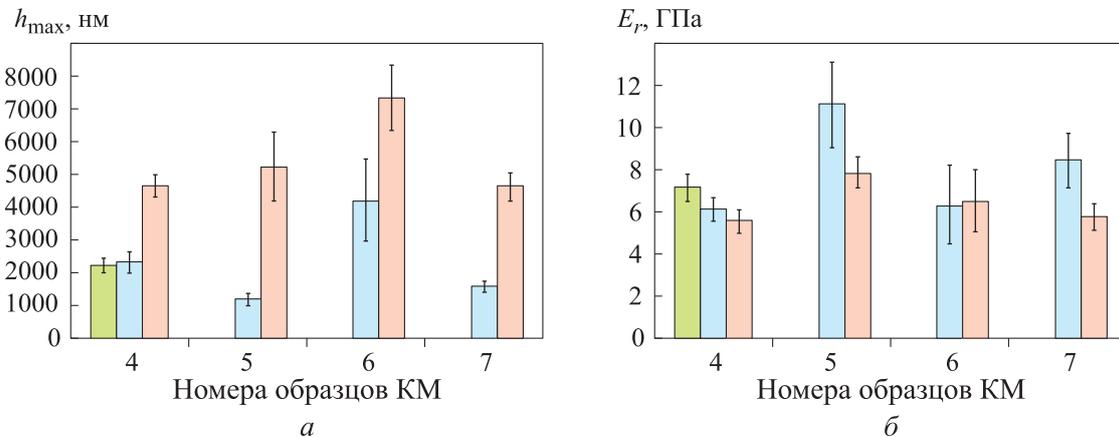


Рис. 4. Значения максимальной глубины индентирования h_{max} (а) и приведенного модуля упругости E_r (б) для образцов КМ при нагрузке $P = 100$ (■), 50 (□) мН и 50 мН с низкой скоростью индентирования (■): 4 — УУКМ-С (матрица); 5 — УУКМ-С (стержень); 6 — УУКМ-С (сечение); 7 — УУКМ-И

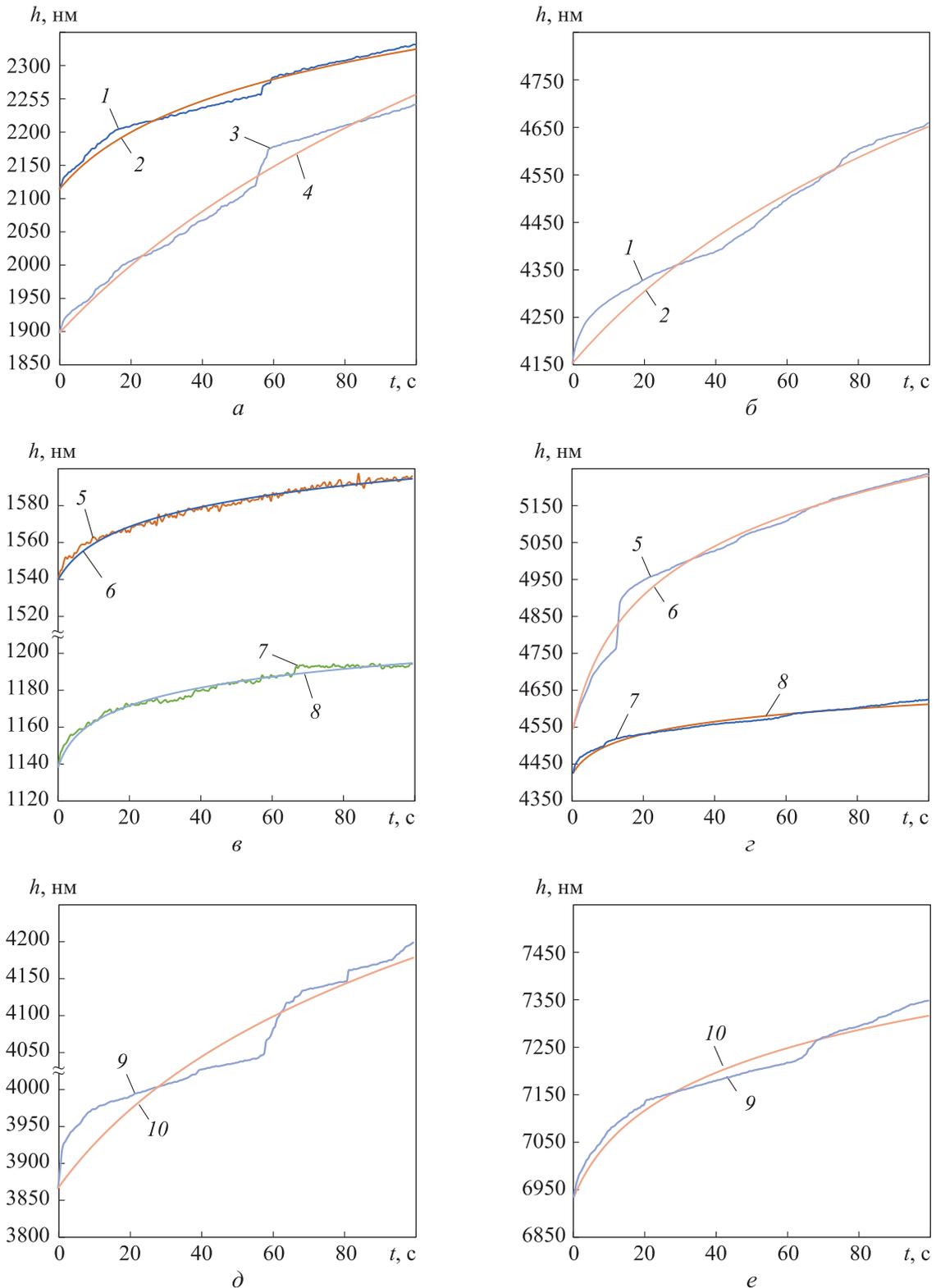


Рис. 5. Экспериментальные (1, 3, 5, 7, 9) и аппроксимирующие (2, 4, 6, 8, 10) зависимости глубины индентирования h разных образцов КМ от времени t при нагрузке $P = 50$ (слева) и 100 кН (справа):
 а, б — матрицы образца УУКМ-С № 4 при высокой (1, 2) и низкой скоростях индентирования (3, 4);
 в, г — образца УУКМ-И № 7 (5, 6) и стержня образца УУКМ-С № 5 (7, 8);
 д, е — сечения образца УУКМ-С № 6 (9, 10)

**Значения коэффициентов в уравнении аппроксимации
экспериментальных данных ползучести при наноиндентировании**

Образец			Нагрузка, мН	Скорость индентирования	Коэффициент		
Материал	Номер	Элемент конструкции			A	B	
Сталь	1	Центр, подложка	50	Высокая	6,58	0,592	
			200		14,3	0,839	
	2		50		7,55	1,349	
			200		15,60	2,790	
УУКМ-С	4	Матрица	50	Низкая	410,45	0,014	
			50		Высокая	108,24	0,061
			100			474,26	0,019
	5	Стержень	50	Высокая	15,28	0,385	
			100		223,91	0,205	
	6	Сечение	50	Низкая	228,09	0,029	
100			148,58		0,120		
УУКМ-И	7	Центр, подложка	50	Высокая	18,29	0,187	
			100		54,02	0,307	

Анализ кривых ползучести при наноиндентировании с помощью уравнения (6) позволил установить, что коэффициент A характеризует податливость материала (обратное от упругости), а коэффициент B — его вязкостную составляющую (сопротивление пластической деформации). Так, полученные для образцов стали минимальные значения коэффициентов A (от 6,6, образец № 1, $P = 50$ мН) и максимальные значения коэффициента B (до 2,7, образец № 2, $P = 200$ мН) свидетельствуют о высокой упругости материала и наличии вязкопластической деформации, минимальной хрупкости. Это подтверждают и определенные для образцов стали максимальные значения приведенного модуля упругости (до 269 ГПа) и относительно гистерезиса (до 0,93).

У образцов КМ минимальные значения коэффициента A получены для стержня образца УУКМ-С № 5 (от 15,3) при нагрузке $P = 50$ мН и для образца УУКМ-И № 7. Максимальные значения коэффициента B (до 0,38) обнаружены у образца № 5, что указывает на отсутствие процессов разрушения при испытании, т. е. на минимальную хрупкость. Максимальное значение коэффициента A (474,3) и минимальное значение коэффициента B (0,02) получены для матрицы образца УУКМ-С № 4 при нагрузке $P = 100$ мН. Это свидетельствует о высокой

хрупкости этого образца и подтверждено характерными выступами на кривой ползучести (см. рис. 5, а и б).

Выводы

1. Показано, что коэффициенты A и B в уравнении (6) характеризуют соответственно податливость материала (обратное от упругости) и вязкостную составляющую материала (сопротивление пластической деформации). Установлено, что анализ кривых ползучести при наноиндентировании с помощью уравнения (6) позволяет делать выводы о хрупкости материала. Образцы КМ являются более хрупкими, чем образцы стали, что подтверждено скачками на кривых ползучести при наноиндентировании, а также значительным увеличением коэффициента A и уменьшением коэффициента B в уравнении (6) для образцов КМ по сравнению с образцами стали при анализе данных кривых.

2. Определено, что увеличение нагрузки при наноиндентировании не всегда ведет к снижению разброса показателей образцов КМ. Это справедливо при исследовании матрицы образца КМ и образцов стали, но при испытании стержня КМ разброс полученных показателей (в том числе и при определении модуля упруго-

сти) возрастает. Показано, что характеристики сечения стержня образца УУКМ-С и образца УУКМ-И близки к характеристикам матрицы образца УУКМ-С.

3. Для всех исследованных образцов КМ получены кривые ползучести с характерными ступеньками, которые свидетельствуют о начале процессов разрушения/трещинообразования в КМ. Однако это явление не характерно для стержня образца УУКМ-С при малой нагрузке

(50 мН) и для образца УУКМ-И. Для этих образцов получены типичные кривые ползучести.

4. Несколько меньшие значения приведенного модуля упругости образцов стали при меньшей нагрузке связаны с высокой шероховатостью поверхности и ее влиянием на полученные свойства материала. Также наблюдались высокие значения относительного гистерезиса для образцов стали, что указывает на их достаточно высокую пластичность.

Литература

- [1] Fischer-Cripps A.C. Nanoindentation test standards. In: Nanoindentation. Springer, 2011, pp. 181–198, doi: https://doi.org/10.1007/978-1-4419-9872-9_10
- [2] Головин Ю.И. *Наноиндентирование и его возможности*. Москва, Машиностроение, 2009. 311 с.
- [3] Godzinski P. An apparatus for the indentation data continuous recording. *Plastics*, 1953, vol. 18, pp. 312–314.
- [4] Терновский А.П., Алехин В.Л., Шоршоров М.Х. и др. О микромеханических испытаниях материалов путем вдавливания. *Заводская лаборатория*, 1973, т. 39, № 10, с. 1242–1246.
- [5] Булычев С.И., Алехин В.П., Шоршоров М.Х. и др. Определение модуля Юнга по диаграмме погружения индентора. *Заводская лаборатория*, 1975, т. 41, с. 1137–1140.
- [6] Булычев С.И., Алехин В.П. *Испытание материалов непрерывным вдавливанием индентора*. Москва, Машиностроение, 1990. 223 с.
- [7] Вахрушев А.В., Шушков А.В., Шушков А.А. Экспериментальное исследование модуля упругости юнга и твердости микрочастиц железа методом индентирования. *Химическая физика и мезоскопия*, 2009, т. 11, № 2, с. 258–262.
- [8] Рудницкий В.А., Крень А.П., Ланцман Г.А. Оценка пластичности металлических материалов методом динамического индентирования. *Литье и металлургия*, 2017, № 2, с. 81–87, doi: <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2017-2-81-87>
- [9] Крень А.П., Мацулевич О.В., Делендик М.Н. Оценка погрешности определения физико-механических характеристик материалов при их контроле методом индентирования. *Приборы и методы измерений*, 2018, т. 9, № 3, с. 263–271, doi: <https://doi.org/10.21122/2220-9506-2018-9-3-263-271>
- [10] Сказочкин А.В., Бондаренко Г.Г., Жуковский П. Исследование износостойкости поверхности алюминиевого сплава, модифицированного минералами, методом склерометрии. *Приборы и методы измерений*, 2019, т. 10, № 3, с. 263–270, doi: <https://doi.org/10.21122/2220-9506-2019-10-3-263-270>
- [11] Liu K., Ostadhassan M., Bubach B. Applications of nano-indentation methods to estimate nanoscale mechanical properties of shale reservoir rocks. *J. Nat. Gas Sci. Eng.*, 2016, vol. 35-A, pp. 1310–1319, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2016.09.068>
- [12] Kontomaris S.V. The Hertz model in AFM nanoindentation experiments: applications in biological samples and biomaterials. *Micro Nanosyst.*, 2018, vol. 10, no. 1, pp. 11–22, doi: <https://doi.org/10.2174/1876402910666180426114700>
- [13] Van Helvert S., Friedl P. Strain stiffening of fibrillar collagen during individual and collective cell migration identified by AFM nanoindentation. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2016, vol. 8, no. 34, pp. 21946–21955, doi: <https://doi.org/10.1021/acsami.6b01755>
- [14] Long X., Dong R., Su Y. et al. Critical review of nanoindentation-based numerical methods for evaluating elastoplastic material properties. *Coatings*, 2023, vol. 13, no. 8, art. 1334, doi: <https://doi.org/10.3390/coatings13081334>
- [15] Aniskevich K., Starkova O., Jansons J. et al. *Long-term deformability and aging of polymer matrix composites*. Nova Science, 2012. 190 p.
- [16] Анискевич К., Старкова О. Оценка вязкопластической деформации ПЭВП, наполненного многостенными углеродными нанотрубками, с использованием соотноше-

- ния скоростей реакции. *Механика композитных материалов*, 2021, т. 57, № 5, с. 823–838, doi: <https://doi.org/10.22364/mkm.57.5.02>
- [17] Gan M., Tomar V. Scale and temperature dependent creep modeling and experiments in materials. *JOM*, 2011, vol. 63, no. 9, pp. 27–34, doi: <https://doi.org/10.1007/s11837-011-0154-7>
- [18] Liu K., Ostadhassan M., Bubach B. et al. Nano-dynamic mechanical analysis (nano-DMA) of creep behavior of shales: Bakken case study. *J. Mater. Sci.*, 2018, vol. 53, no. 7, pp. 4417–4432, doi: <https://doi.org/10.1007/s10853-017-1821-z>
- [19] Ma Z., Pathegama Gamage R., Zhang C. Application of nanoindentation technology in rocks: a review. *Geomech. Geophys. Geo-energ. Geo-resour.*, 2020, vol. 6, art. 60, doi: <https://doi.org/10.1007/s40948-020-00178-6>
- [20] Maxwell A.S., Monclus M.A., Jennett N.M. et al. Accelerated testing of creep in polymeric materials using nanoindentation. *Polym. Test.*, 2011, vol. 30, no. 4, pp. 366–371, doi: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2011.02.002>
- [21] Peng G., Ma Y., Feng Y. et al. Nanoindentation creep of nonlinear viscoelastic polypropylene. *Polym. Test.*, 2015, vol. 43, pp. 38–43, doi: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2015.02.006>

References

- [1] Fischer-Cripps A.C. Nanoindentation test standards. In: Nanoindentation. *Springer*, 2011, pp. 181–198, doi: https://doi.org/10.1007/978-1-4419-9872-9_10
- [2] Golovin Yu.I. *Nanoindentirovanie i ego vozmozhnosti* [Nanoindentation and its capabilities]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2009. 311 p. (In Russ.).
- [3] Godzinski P. An apparatus for the indentation data continuous recording. *Plastics*, 1953, vol. 18, pp. 312–314.
- [4] Ternovskiy A.P., Alekhin V.L., Shorshorov M.X. et al. On micromechanical testing of materials by indentation. *Zavodskaya laboratoriya*, 1973, vol. 39, no. 10, pp. 1242–1246. (In Russ.).
- [5] Bulychev S.I., Alekhin V.P., Shorshorov M.Kh. et al. O Determination of Young's modulus from the indenter immersion diagram. *Zavodskaya laboratoriya*, 1975, vol. 41, pp. 1137–1140. (In Russ.).
- [6] Bulychev S.I., Alekhin V.P. *Ispytanie materialov nepreryvnym vdavlivaniem indentora* [Testing materials by continuous indentation]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1990. 223 p. (In Russ.).
- [7] Vakhrushev A.V., Shushkov A.V., Shushkov A.A. Investigation of metals microparticles mechanical characteristics by indentation method *Khimicheskaya fizika i mezoskopiya* [Chemical Physics and Mesoscopy], 2009, vol. 11, no. 2, pp. 258–262. (In Russ.).
- [8] Rudnitskiy V.A., Kren A.P., Lantsman G.A. Evaluation of metallic materials plasticity by dynamic indentation method. *Litye i metallurgiya* [Foundry Production and Metallurgy], 2017, no. 2, pp. 81–87, doi: <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2017-2-81-87> (in Russ.).
- [9] Kren A.P., Matsulevich O.V., Delendik M.N. Error estimation of the physical and mechanical characteristics measurements by indentation. *Pribory i metody izmereniy* [Devices and Methods of Measurements], 2018, vol. 9, no. 3, pp. 263–271, doi: <https://doi.org/10.21122/2220-9506-2018-9-3-263-271> (in Russ.).
- [10] Skazochkin A.V., Bondarenko G.G., Zhukovskiy P. Research of surface wear resistance of aluminum alloy modified with minerals using sclerometry method. devices and methods of measurements. *Pribory i metody izmereniy* [Devices and Methods of Measurements], 2019, vol. 10, no. 3, pp. 263–270, doi: <https://doi.org/10.21122/2220-9506-2019-10-3-263-270> (in Russ.).
- [11] Liu K., Ostadhassan M., Bubach B. Applications of nano-indentation methods to estimate nanoscale mechanical properties of shale reservoir rocks. *J. Nat. Gas Sci. Eng.*, 2016, vol. 35-A, pp. 1310–1319, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2016.09.068>
- [12] Kontomaris S.V. The Hertz model in AFM nanoindentation experiments: applications in biological samples and biomaterials. *Micro Nanosyst.*, 2018, vol. 10, no. 1, pp. 11–22, doi: <https://doi.org/10.2174/1876402910666180426114700>
- [13] Van Helvert S., Friedl P. Strain stiffening of fibrillar collagen during individual and collective cell migration identified by AFM nanoindentation. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2016, vol. 8, no. 34, pp. 21946–21955, doi: <https://doi.org/10.1021/acsami.6b01755>

- [14] Long X., Dong R., Su Y. et al. Critical review of nanoindentation-based numerical methods for evaluating elastoplastic material properties. *Coatings*, 2023, vol. 13, no. 8, art. 1334, doi: <https://doi.org/10.3390/coatings13081334>
- [15] Aniskevich K., Starkova O., Jansons J. et al. *Long-term deformability and aging of polymer matrix composites*. Nova Science, 2012. 190 p.
- [16] Aniskevich K., Starkova O. Evaluation of the viscoplastic strain of high-density polyethylene/multiwall carbon nanotube composites using the reaction rate relation. *Mekhanika kompozitnykh materialov*, 2021, vol. 57, no. 5, pp. 823–838, doi: <https://doi.org/10.22364/mkm.57.5.02> (in Russ.). (Eng. version: *Mech. Compos. Mater.*, 2021, vol. 57, no. 24, pp. 577–586, doi: <https://doi.org/10.1007/s11029-021-09980-z>)
- [17] Gan M., Tomar V. Scale and temperature dependent creep modeling and experiments in materials. *JOM*, 2011, vol. 63, no. 9, pp. 27–34, doi: <https://doi.org/10.1007/s11837-011-0154-7>
- [18] Liu K., Ostadhassan M., Bubach B. et al. Nano-dynamic mechanical analysis (nano-DMA) of creep behavior of shales: Bakken case study. *J. Mater. Sci.*, 2018, vol. 53, no. 7, pp. 4417–4432, doi: <https://doi.org/10.1007/s10853-017-1821-z>
- [19] Ma Z., Pathegama Gamage R., Zhang C. Application of nanoindentation technology in rocks: a review. *Geomech. Geophys. Geo-energ. Geo-resour.*, 2020, vol. 6, art. 60, doi: <https://doi.org/10.1007/s40948-020-00178-6>
- [20] Maxwell A.S., Monclus M.A., Jennett N.M. et al. Accelerated testing of creep in polymeric materials using nanoindentation. *Polym. Test.*, 2011, vol. 30, no. 4, pp. 366–371, doi: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2011.02.002>
- [21] Peng G., Ma Y., Feng Y. et al. Nanoindentation creep of nonlinear viscoelastic polypropylene. *Polym. Test.*, 2015, vol. 43, pp. 38–43, doi: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2015.02.006>

Статья поступила в редакцию 31.07.2025

Информация об авторах

КОРНЕВ Юрий Витальевич — кандидат технических наук, старший научный сотрудник. ФГБУН Институт прикладной механики РАН (125040, Москва, Российская Федерация, Ленинградский пр-т, д. 7, стр. 1, e-mail: yurikornev@mail.ru).

ГИЛЯЗОВА Рената Фаритовна — младший научный сотрудник. ФГБУН Институт прикладной механики РАН (125040, Москва, Российская Федерация, Ленинградский пр-т, д. 7, стр. 1, e-mail: renata.gilyazova@gmail.com).

МУРАШОВ Михаил Владимирович — доктор технических наук, доцент, первый заместитель заведующего кафедрой, профессор кафедры «Компьютерные системы автоматизации производства». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5 стр. 1, e-mail: murashov@bmstu.ru).

Information about the authors

KORNEV Yuri Vitalievich — Candidate of Science (Eng.), Senior Researcher. Institute of Applied Mechanics of the Russian Academy of Sciences (125040, Moscow, Russian Federation, Leningradsky Ave., Bldg. 7, Block 1, e-mail: yurikornev@mail.ru).

GILYAZOVA Renata Faritovna — Junior Researcher. Institute of Applied Mechanics of the Russian Academy of Sciences (125040, Moscow, Russian Federation, Leningradsky Ave., Bldg. 7, Block 1, e-mail: renata.gilyazova@gmail.com).

MURASHOV Mikhail Vladimirovich — Doctor of Science (Eng.), Associate Professor, First Deputy Head of Department, Professor of the Department of Computer Systems for Industrial Automation. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Bldg. 1, e-mail: murashov@bmstu.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Корнев Ю.В., Гилязова Р.Ф., Мурашов М.В. Экспериментальное исследование механических свойств материалов конструкционного назначения методом наноиндентирования. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2025, № 11, с. 13–22.

Please cite this article in English as:

Kornev Yu.V., Gilyazova R.F., Murashov M.V. Experimental study of mechanical properties of structural materials applying nanoindentation method. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2025, no. 11, pp. 13–22.