5. *Tkachuk A.P., Gushchin V.A., Kulyabina T.V. et al.* Scientific research and development of measurement procedures for the content of pathogenic biological agents in the biological matrix and certified reference materials for composition and properties of pathogenic biological agents / V International Scientific Conference «Reference Materials in Measurements and Technologies» / https://www.researchgate.net/publication/366070578_Scientific_research_and_development_of_measurement_procedures_for_the_content_of_pathogenic_biological_agents_in_the_biological_matrix_and_certified_reference_materials_for_composition_and_properties_ (дата обращения: 28.07.2025).
6. *Morozova V.V., Kulyabina E.V., Morozov V.Yu. et al.* Nominal Reference Materials of Biological Substances. 2024 / In book: Reference Materials in Measurement and Technology / https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-49200-6_4 (дата обращения: 28.07.2025).
7. Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений / https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry/16 (дата обращения: 28.07.2025).
8. Санитарно-эпидемиологические правила СП 1.3.3118-13 «Безопасность работы с микроорганизмами I-II групп патогенности (опасности)» / Приложение 3. – М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2014. 195 с.
9. Microbiological reference material LGCMIC-RM06 / https://assets.lgcstandards.com/sys-master%2Fpdfs%2Fhd7%2Fh93%2F10760544387102%2FCOA_LGCMIC-RM06-S1-E4_ST-WB-CERT-6437518-1-1-1.PDF (дата обращения: 28.07.2025).
10. Reference Material 8048 Human Fecal Material. Reference material information sheet / https://tsapps.nist.gov/srmext/certificates/8048.pdf (дата обращения: 28.07.2025).
11. Reference Material 8376 Microbial Pathogen DNA Standards for Detection and Identification. Reference material information sheet / https://tsapps.nist.gov/srmext/certificates/8376.pdf (дата обращения: 28.07.2025).
12. Reference Material 8671 NISTmAb, Humanized IgG1κ Monoclonal Antibody / https://tsapps.nist.gov/srmext/certificates/8671.pdf (дата обращения: 28.07.2025).

Елена Валериевна Кулябина,
канд. техн. наук, начальник лаборатории,
лаборатория метрологического обеспечения биологических и информационных технологий,
ФБУ «Научно-исследовательский центр прикладной метрологии – Ростест»,
доцент,
ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет»,
Татьяна Валериевна Кулябина,
канд. физ.-мат. наук, ведущ. научный сотрудник,
отдел координации научных исследований и разработок,
ФБУ «Научно-исследовательский центр прикладной метрологии – Ростест»,
г. Москва,
Валерия Витальевна Морозова,
студент,
California State University,
г. Лос-Анджелес, Калифорния, США,
Ольга Николаевна Мелкова,
ведущий инженер,
лаборатория метрологического обеспечения биологических и информационных технологий,
ФБУ «Научно-исследовательский центр прикладной метрологии – Ростест»,
Виталий Юрьевич Морозов,
менеджер,
ООО «Группа компаний «Русагро»,
г. Москва,
e-mail: kuliabina@mail.ru

* * * * *

К.И. Доронин, А.С. Голев, А.С. Уманский, А.В. Мельникова

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ УДАРНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ НА РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ ДИНАМИЧЕСКОГО ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО ИНДЕНТИРОВАНИЯ

Аннотация
Проведено исследование влияния параметров ударного преобразователя, таких как масса и радиус наконечника (индентора) ударника, а также скорость удара, на результаты расчета механических характеристик методом динамического инструментального индентирования. Приведены экспериментальные данные и расчетные значения твердости и модуля упругости, полученные на образце стали марки 20Х25Н20С2. Определены зависимости рассчитанных значений твердости и модуля упругости при отклонении от номинальной массы ударника, радиуса индентора и скорости удара. Показано, что рассчитанные значения механических характеристик могут изменяться более чем на 13 % при отклонении параметров ударника от номинальных значений на 10 %.

Ключевые слова: динамическое инструментальное индентирование, индентор, твердость, модуль упругости.

Введение

Определение физико-механических свойств материалов и покрытий необходимо для последующего диагностирования элементов инженерных сооружений [1]. Особое внимание уделяется качеству ответственных узлов и элементов, эксплуатируемых в таких условиях [2], где техническое состояние системы зависит от способности материалов сопротивляться деформационным процессам, т. е. от их механических свойств. При этом необходимо учитывать повышение требований к надежности систем [3], [4]. В сфере определения физико-механических характеристик наиболее актуален переход к портативным средствам контроля [5]. Безобразцовый контроль позволяет повысить контролепригодность различных технических объектов, в том числе в процессе их эксплуатации [6], [7]. Безобразцовые методы обеспечивают возможность локального определения свойств материалов без разрушения объекта контроля. Ранее, например, упругие свойства оценивались с помощью разрушающих испытаний на растяжение [8], однако в последнее время широкое распространение получили методы индентирования [9], [10]. В ряде случаев контроль твердости материалов [11], [12] может использоваться для определения технического состояния и остаточного ресурса объекта контроля [13]. Метод инструментального индентирования применялся преимущественно в лабораториях, но в настоящее время наблюдается тенденция его адаптации применительно к портативной реализации – методу динамического инструментального индентирования (ДИИ) [14], [15]. С помощью анализа параметров контактно-ударного взаимодействия (КУВ) возможно измерить такие параметры, как твердость и модуль упругости, что потенциально позволяет оценивать предел текучести [16] и контролировать изменение свойств материала [17].

Как отмечено в [18], применение стандартных мер твердости для оценки погрешности измерения механических свойств при динамическом индентировании не всегда возможно на практике. На текущий момент для сравнительной оценки неопределенности метода ДИИ можно использовать методы квазистатического индентирования, так как в таком случае определяется тот же перечень механических характеристик, что и при ДИИ [19]. Но в таком случае необходимы дополнительные исследования, так как в методе ДИИ деформационные процессы протекают быстрее вследствие ударного взаимодействия [20], [21]. Время контактного взаимодействия влияет на процедуру определения свойств различных материалов [22], [23]. Помимо конструктивных фак-

торов [24], [25], существуют и методические особенности обработки диаграмм индентирования, описанные в [26]. В настоящей работе используется лишь один принцип расчета механических свойств, представленный в [27].

Помимо классических для индентирования источников неопределенности [28], метод ДИИ обладает особенностями аппаратной реализации, которые необходимо учитывать при оценке его метрологических характеристик. Для получения значений в настоящей работе применяются оборудование и алгоритм, описанный в [5], где в процессе расчета используются заранее известные параметры индентора и скорость, с которой производится КУВ. Однако данные параметры могут отличаться от номинальных, что может приводить к возникновению дополнительной погрешности, т. е. имеется необходимость оценить их влияние на результат методики расчета. В настоящий момент метод ДИИ стандартизирован лишь по ГОСТ Р 56474–2015 [27], в котором не прописаны требования к измерительному оборудованию с точки зрения геометрических и энергетических параметров ударников. Решением может являться использование измерительных преобразователей для определения твердости по шкале Либа по ГОСТ Р 8.969–2019 [29], модернизированных для реализации метода ДИИ [5]. Вдобавок, стандарт [27] для метода ДИИ ограничен областью применения и описывает лишь общие требования к измерительному оборудованию, что препятствует развитию метода в качестве безобразцового способа определения механических свойств портативными средствами.

Таким образом, **цель исследования** состоит в оценке влияния параметров ударного преобразователя (радиуса наконечника, массы ударника и скорости удара) на результаты расчета механических характеристик. Настоящая работа необходима для последующего нормирования требований к ударным преобразователям для обеспечения необходимой точности определения механических характеристик методом ДИИ.

Методика проведения эксперимента

Аппаратная реализация метода ДИИ заключается в регистрации сигнала ЭДС (*рис. 1*), генерируемого в катушке индуктивности при падении и отскоке ударника, содержащего в себе постоянный магнит. Схема измерительного преобразователя соответствует [5]. Параметры ударника (датчик типа D) регламентированы ГОСТ Р 8.969–2019 и составляют m = 5,45 г; R = 1,5 мм; $V_П$ = 2,05 м/с [29].

Для определения параметров используется одно измерение, записанное осциллографом с частотой f = 10 МГц. В процессе обработки применяется низкочастотный фильтр с частотой среза 32 кГц; на *рис. 1* представлены исходный и отфильтрованный сигналы $u(t)$. Время контактного взаимодействия составило t = 38,4 мкс.

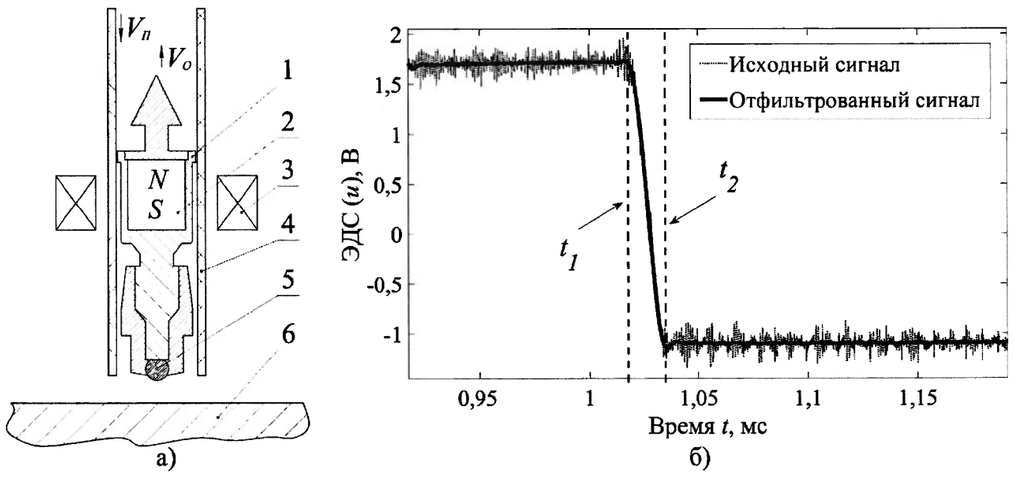


Рис. 1. Схема измерительного преобразователя (а): 1 – корпус ударника; 2 – катушка индуктивности; 3 – постоянный магнит; 4 – направляющая трубка; 5 – сферический наконечник (индентор); 6 – испытываемая поверхность; б) записанный сигнал ЭДС [составлено авторами]

Далее с помощью автоматизированного алгоритма, разработанного в математическом пакете MATLAB, производился расчет значений твердости H_{IT} и модуля упругости E_{IT} в соответствии с ГОСТ Р 56474–2015 [27]. Работа алгоритма заключается в следующем.

После выделения этапа КУД полученное значение ЭДС приводится к скорости $V(t)$, так как скорость в момент удара $V_П$ соответствует максимальному значению u_{max}:

$$V(t) = u(t) \cdot (V_n / u_{max}). \quad (1)$$

Численным интегрированием в пределах времени контакта (*рис. 1*) рассчитывается глубина внедрения индентора $h(t)$:

$$h(t) = \int_{t_1}^{t_2} V(t)\,dt. \quad (2)$$

Для расчета контактного усилия $P(t)$ используется масса ударника (индентора) m и ускорение a, получаемое путем численного дифференцирования скорости по времени:

$$P(t) = m \cdot a = m\frac{dV(t)}{dt}. \quad (3)$$

По полученным зависимостям контактного усилия $P(t)$ и глубины внедрения $h(t)$ от времени строится диаграмма внедрения, представленная на *рис. 2*. В соответствии с ГОСТ Р 56474–2015: h_f – остаточная глубина внедрения; h_r – точка пересечения касательной, приведенной к кривой разгрузки диаграммы в точке P_{max}, к оси глубины h; h_c – контактная глубина внедрения; h_{max} – максимальная глубина внедрения.

В настоящей работе значение h_r точки пересечения касательной и оси абсцисс находится расчетным путем с помощью соотношения (4):

$$h_r = h_{max} - 2(h_{max} - h_f) / 3. \quad (4)$$

Данное значение используется для определения контактной жесткости, равной тангенсу угла наклона прямой $h_{max} - h_r$ в проекции на контактное усилие P:

$$S = P_{hmax} / (h_{max} - h_f). \quad (5)$$

Для расчета контактной глубины h_c, т. е. глубины вдавливания, на которой индентор находится в контакте с исследуемой поверхностью, применяется выражение

$$h_c = h_{max} - (h_{max} - h_f) / 2. \quad (6)$$

В случае сферического индентора контактная глубина используется для получения величины контактной площади A_c (проекции отпечатка),

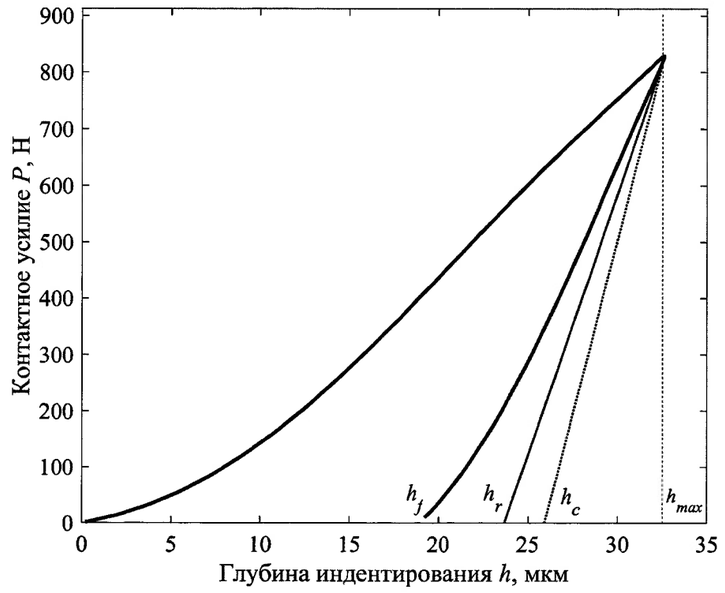


Рис. 2. Построенная диаграмма индентирования $P(h)$ [составлено авторами]

зависящей от радиуса применяемого индентора R:

$$A_c = 2\text{p} \cdot R \cdot h_c. \quad (7)$$

Контактная глубина и жесткость в дальнейшем используются для расчета твердости и приведенного модуля упругости по формулам (8) и (9) соответственно:

$$H_{IT} = P_{hmax} / A_c; \quad (8)$$

$$E_r = \frac{S\sqrt{\pi}}{2\sqrt{A_c}}. \quad (9)$$

Модуль при индентировании, принимаемый аналогом модуля упругости (модуль Юнга), вычисляется соотношением

$$E_{IT} = \frac{1-\nu_1^2}{\frac{1}{E_r} - \frac{1-\nu_2^2}{E_2}}. \quad (10)$$

Значения E_2 и ν_2 (модуль упругости и коэффициент Пуассона материала индентора) и ν_1 (коэффициент Пуассона исследуемого материала) принимаются заранее известными константами со значениями соответственно 710 ГПа и 0,31 для карбида вольфрама и 0,27 для стали.

В качестве объекта испытаний был использован образец стали марки 20Х25Н20С2. Механические свойства материала приведены в *табл. 1*. Для определения твердости по шкале Виккерса использовался микротвердомер ПМТ-3М (нагрузка 200 г), испытания проводились в соответствии с ГОСТ 9450–76 [30]. Для определения характеристик твердости и модуля упругости при индентировании использовалась установка сканирующего нанотвердомера «Наноскан-4D+» (производитель – ФГБНУ «ТИСНУМ», Россия), испытания проводились в соответствии с ГОСТ Р 8.748–2011 [31] при нагрузке 60 мН. Значения твердости, полученные при наноиндентировании, оказывались выше, чем значения, полученные при испытаниях по определению твердости по Виккерсу. Частично это объясняется размерным эффектом [32]-[34].

Оценка влияния отклонения параметров ударного преобразователя на результаты расчета механических характеристик образца производилась путем расчета значения измеряемой величины при отклонении параметра ударника от номинального. В случае ДИИ влияние параметров индентора, например радиуса наконечника, на конечные механические свойства оценить трудоемко, как и для метода статического индентирования [35], так как тело индентора жестко закреплено в ударнике (*рис. 1*). Важно учесть, что при реальном изменении массы, радиуса или скорости ударника возможно изменение значений наводимой ЭДС и времени КУВ, поэтому данное исследование сконцентрировано на влиянии этих параметров исключительно на методику расчета механических характеристик.

1 Влияние массы ударника

Номинальное значение массы ударника составляет m = 5,45 г. Отклонение массы было выбрано исходя из возможного относительного отклонения на ± 10 %, т. е. m = [4,905…5,995].

На *рис. 3* представлены диаграммы индентирования для некоторых различных масс ударника. Диаграмма, полученная при обработке с номинальной массой, изображена сплошной линией. Таким образом, при варьировании массы изменяется тангенс угла наклона этапа разгрузки, что влияет на расчет упруго-пластических свойств.

Полученные расчетные значения приведены в *табл. 2*. Результаты для номинального значения массы соответствуют строке 6. Отклонение Δ показывает отклонение значения характеристики от величины, полученной при номинальной массе.

При максимальном отклонении массы на 10 % отклонения твердости и модуля упругости составляют 10 и 13,17 % соответственно. На *рис. 4* представлена линейная зависимость твердости и модуля упругости от массы. Объясняется это тем, что в процессе работы алгоритма приведение ускорения к известной физической величине (массе) происходит после дифференцирования самой скорости [выражение (3)]. Для максимального

Таблица 1

Механические характеристики образца стали 20Х25Н20С2 [составлено авторами]

Характеристика	Твердость по Виккерсу HV, ГПа	Наноиндентирование	
		Твердость H_{IT}, ГПа	Модуль упругости E_{IT}, ГПа
Значение	3,19 ± 0,11	4,22 ± 0,35	205 ± 12

значения силы влияние массы критично, поэтому на диаграммах индентирования (*рис. 3*) заметно отклонение контактного усилия P для разных масс.

Для численного анализа был использован метод линейного приближения с определением параметров линии тренда первого порядка (a, c):

$$y = ax + c. \quad (11)$$

Для твердости (12) и модуля упругости (13) значения составили:

$$y = 0{,}6228x + 0{,}0001448; \quad (12)$$

$$y = 47{,}66x + 56{,}36. \quad (13)$$

2 Изменение скорости удара

Номинальное значение скорости составляет $V_П$ = 2,05 м/с. Отклонение скорости было выбрано исходя из возможного относительного отклонения на ± 10 %, т. е. $V_П$ = [1,845…2,255].

На *рис. 5* представлены диаграммы индентирования для некоторых различных скоростей удара. Диаграмма, полученная при обработке с номинальной скоростью удара, на *рис. 5* представлена сплошной линией. Таким образом, при варьировании массы изменяется тангенс угла

Таблица 2

Изменение расчетных значений механических характеристик при отклонении массы ударника от номинального [составлено авторами]

№ п/п	Масса m, г	Отклонение, Δm, %	H_{IT}, ГПа	ΔH_{IT}, %	E_{IT}, ГПа	ΔE_{IT}, %
1	4,905	10	3,0547	10	177,8955	12,45
2	5,100	6,42	3,1762	6,42	186,7873	8,07
3	5,250	3,67	3,2696	3,67	193,7472	4,65
4	5,400	0,91	3,3630	0,92	200,8139	1,17
5	5,440	0,18	3,3879	0,18	202,7168	0,23
6	**5,450**	**0**	**3,3941**	**0**	**203,1937**	**0**
7	5,460	0,18	3,4004	0,19	203,6711	0,23
8	5,500	0,91	3,4253	0,92	205,5857	1,18
9	5,650	3,67	3,5187	3,67	212,8363	4,76
10	5,800	6,42	3,6121	6,42	220,2006	8,37
11	5,995	10	3,7336	10	229,9487	13,17

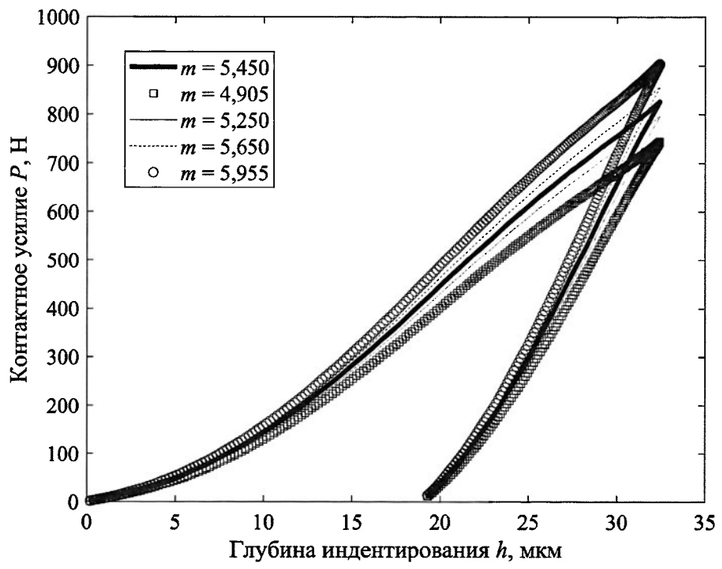


Рис. 3. Диаграммы индентирования для разных масс ударника [составлено авторами]

наклона этапа разгрузки, что влияет на расчет упруго-пластических свойств.

Полученные значения механических характеристик приведены в *табл. 3*.

Изменения в значении твердости при варьировании скорости ударника не обнаружено (*табл. 3*). Это объясняется тем, что расчет твердости зависит от соотношения между максимальной и остаточной глубиной внедрения $h_{max} - h_r$, а оно остается постоянным.

Для модуля упругости влияние скорости составило 7 %, что значительно ниже, чем изменение массы. В данном случае имеется отклонение типа зависимости от линейной (*рис. 6*). Однако на диаграммах индентирования (*рис. 5*) не фиксируется значительного изменения угла наклона этапа разгрузки. На *рис. 6* значение номинальной скорости и рассчитанного при нем модуля упругости аннотировано выноской со значениями.

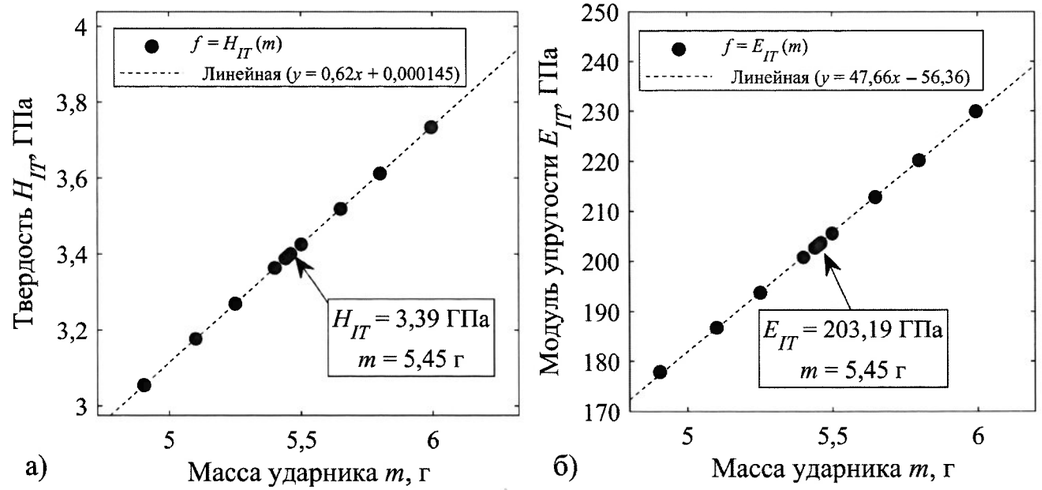


Рис. 4. Изменение результатов расчета механических свойств при разной массе ударника: а) твердость; б) модуль упругости [составлено авторами]

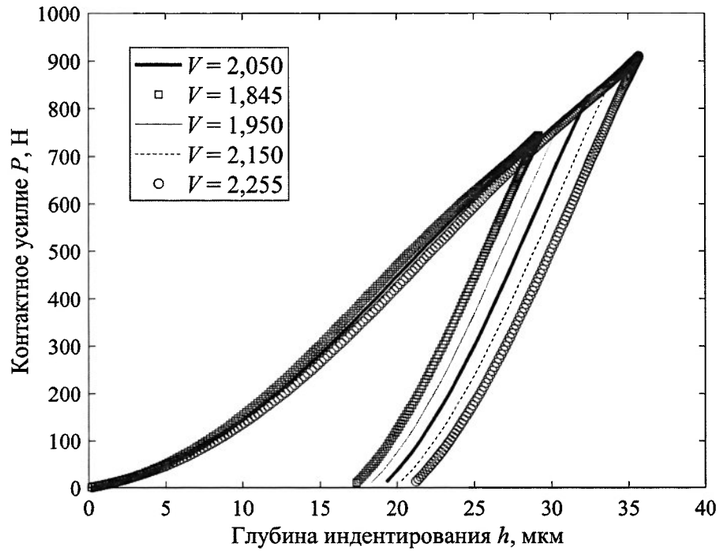


Рис. 5. Диаграммы индентирования для разных скоростей удара [составлено авторами]

Аналогично построены функции линейного приближения для определения параметров a и c линии тренда [выражение (10)]. Для модуля упругости при варьировании скорости удара

$$y = -63{,}83x + 334{,}43. \quad (14)$$

При сравнении данной функции с получаемой зависимостью $f = E_{IT}(V)$ наблюдается отклонение от линейности. Такой характер обусловлен тем, что параметр скорости удара в процессе расчета применяется до интегрирования и дифференцирования [формулы (1), (2)] исходного сигнала для приведения значений напряжения $u(t)$ к скорости $V(t)$. Для дальнейших расчетов функция принимается линейной.

3 Влияние радиуса сферического индентора

Номинальное значение радиуса сферического индентора составляет R = 1,5 мм. Отклонение радиуса было выбрано исходя из возможного относительного отклонения на ± 10 %, т. е. R = [1,35...1,65]. Полученные значения приведены в *табл. 4*.

Таблица 3

Изменение расчетных значений механических характеристик при отклонении скорости ударника от номинального [составлено авторами]

№ п/п	Скорость $V_п$, м/с	Отклонение, %	H_{IT}, ГПа	ΔH_{IT}, %	E_{IT}, ГПа	ΔE_{IT}, %
1	1,845	– 10	3,3941	0	217,4774	+ 7,03
2	1,900	– 7,32	3,3941	0	213,3747	+ 5,01
3	1,950	– 4,88	3,3941	0	209,8256	+ 3,26
4	2,000	– 2,44	3,3941	0	206,4357	+ 1,59
5	2,040	– 0,49	3,3941	0	203,8308	+ 0,31
6	**2,050**	**0**	**3,3941**	**0**	**203,1937**	**0**
7	2,060	+ 0,49	3,3941	0	202,5621	– 0,31
8	2,100	+ 2,44	3,3941	0	200,0895	– 1,53
9	2,150	+ 4,88	3,3941	0	197,1138	– 2,99
10	2,200	+ 7,32	3,3941	0	194,2582	– 4,39
11	2,255	+ 10	3,3941	0	191,2467	– 5,88

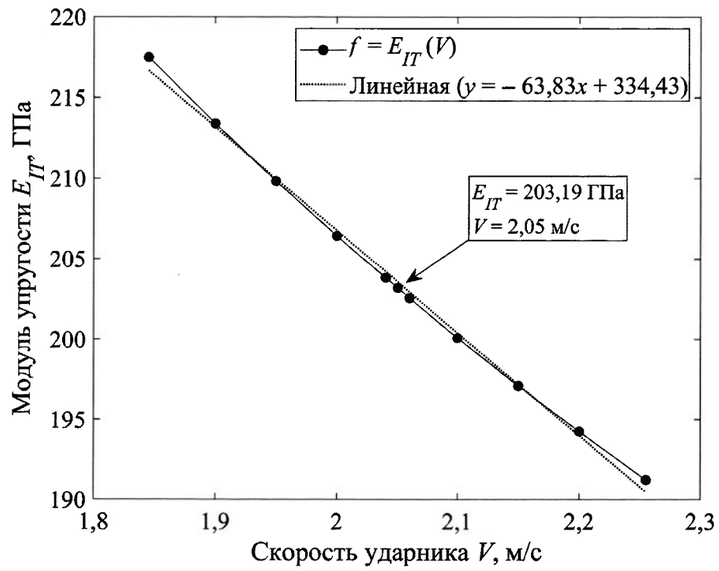


Рис. 6. Изменение модуля упругости при варьировании значения скорости ударника [составлено авторами]

Максимальное отклонений значений для твердости и модуля упругости составило 11 и 7 % соответственно. На *рис. 7* значение номинальной скорости и рассчитанного при ней модуля упругости аннотировано выноской со значениями. Диаграммы индентирования аналогичны, так как значение радиуса индентора не влияет на расчет глубины и усилия. Радиус применяется только при расчете контактной площади в выражении (7).

Уравнения линейной зависимости для твердости [выражение (15)] и модуля упругости [выражение (16)] демонстрируют обратную зависимость параметров:

$$y = -2{,}28x + 6{,}83; \quad (15)$$

$$y = -87{,}24x + 334{,}48. \quad (16)$$

Изменение результатов расчета механических свойств объясняется этапом вычислений по формуле (9) (при этом вклад отклонения радиуса уменьшается с увеличением самого радиуса).

4 Анализ результатов

Полученные результаты оценки влияния массы индентора, его радиуса и скорости удара, а также полученные зависимости были использованы для расчета значений погрешности результата измерений твердости и модуля упругости.

Таблица 4

Изменение расчетных значений механических характеристик при отклонении радиуса индентора от номинального [составлено авторами]

№ п/п	Радиус R, мм	Отклонение, %	H_{IT}, ГПа	ΔH_{IT}, %	E_{IT}, ГПа	ΔE_{IT}, %
1	1,35	– 10	3,7713	11,11	217,4774	+ 7,03
2	1,38	– 8	3,6893	8,69	214,3986	+ 5,51
3	1,42	– 5,33	3,5854	5,64	210,4756	+ 3,58
4	1,45	– 3,33	3,5112	3,45	207,6609	+ 2,19
5	1,49	– 0,67	3,4169	0,67	204,0657	+ 0,43
6	**1,50**	**0**	**3,3941**	**0**	**203,1937**	**0**
7	1,51	+ 0,67	3,3717	0,66	202,3319	– 0,42
8	1,55	+ 3,33	3,2847	3,22	198,9839	– 2,07
9	1,58	+ 5,33	3,2223	5,06	196,5719	– 3,26
10	1,62	+ 8	3,1427	7,41	193,4791	– 4,78
11	1,65	+ 10	3,0856	9,09	191,2467	– 5,88

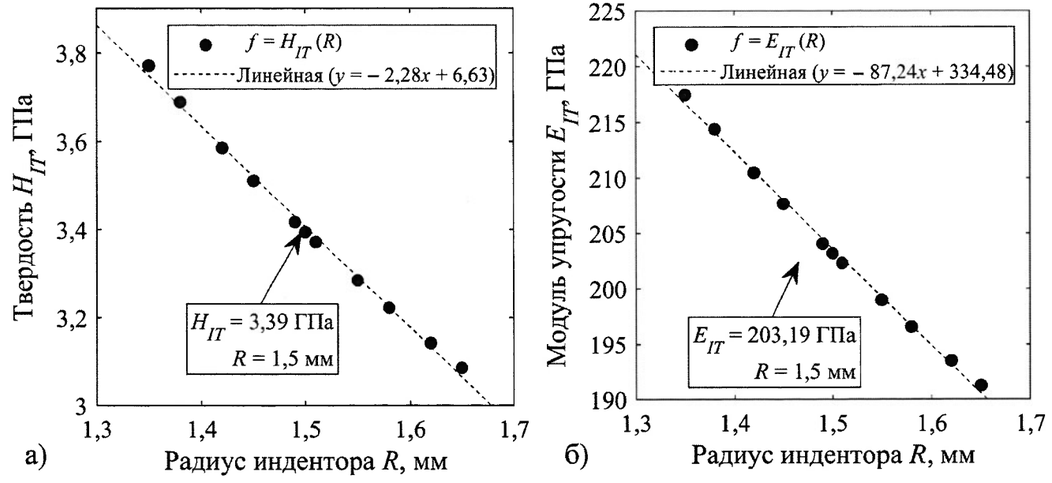


Рис. 7. Изменение результатов расчета механических свойств при разном радиусе индентора: а) твердость; б) модуль упругости [составлено авторами]

По результатам регрессионного анализа была выведена зависимость измеряемых величин твердости и модуля упругости от перечисленных ранее параметров. Полученные функции можно представить в следующем виде [формулы (17), (18)]:

$$H_{IT} = f_H(m, V, R); \quad (17)$$

$$E_{IT} = f_E(m, V, R). \quad (18)$$

Расчет абсолютной погрешности измерений твердости с учетом влияющих параметров произведем по формуле (19):

$$\Delta_H = \sqrt{\left(\frac{\partial H}{\partial m}\Delta_m\right)^2 + \left(\frac{\partial H}{\partial V}\Delta_V\right)^2 + \left(\frac{\partial H}{\partial R}\Delta_R\right)^2}, \quad (19)$$

где $\partial H / \partial m$, $\partial H / \partial V$, $\partial H / \partial R$ – частные производные искомой функции; Δ_m – погрешность массы ударного тела индентора, г; Δ_V – погрешность скорости удара, м/с; Δ_R – погрешность радиуса сферы шарика индентора, мм.

С учетом полученных выше функций [формулы (12), (15)] для твердости производные:

$$\frac{\partial H}{\partial m} = 0{,}62; \quad \frac{\partial H}{\partial V} = 0; \quad \frac{\partial H}{\partial R} = -2{,}28. \quad (20)$$

В качестве требований к параметрам ударного преобразователя предложено взять требования, установленные для ударных преобразователей Либа в соответствии с ISO 16859–2 [36], поскольку для их метрологического обеспечения существует вся необходимая нормативная, методическая и техническая база [37]. Максимально допустимые отклонения массы ударника, скорости удара и радиуса сферы индентора для преобразователя типа D в соответствии с ISO 16859-2 составляют Δ_m = 0,1 г; Δ_V = 0,1 м/с; Δ_R = 0,1 мм.

Конечная формула расчета абсолютной погрешности измерений твердости имеет вид

$$\Delta_H = \sqrt{(0{,}62 \cdot 0{,}1)^2 + (0 \cdot 0{,}1)^2 + (-2{,}28 \cdot 0{,}005)^2} = 0{,}06 \text{ ГПа}. \quad (21)$$

Относительная погрешность измерений твердости рассчитана по формуле (22). В качестве опорного значения твердости H_{IT} в выражении (23) принимается значение, полученное при номинальных параметрах ударного преобразователя:

$$\delta_H = \Delta H / H_{IT} \cdot 100\ \%; \quad (22)$$

$$\delta_H = 0{,}06 / 3{,}39 \cdot 100\ \% = 2\ \%. \quad (23)$$

По аналогичному алгоритму рассчитана абсолютная погрешность измерений модуля упругости по формуле (20) с учетом функций [формулы (13), (14), (16)]:

$$\Delta_E = \sqrt{\left(\frac{\partial E}{\partial m}\Delta_m\right)^2 + \left(\frac{\partial E}{\partial V}\Delta_V\right)^2 + \left(\frac{\partial E}{\partial R}\Delta_R\right)^2}. \quad (24)$$

Для модуля упругости получены следующие производные:

$$\frac{\partial E}{\partial m} = 47{,}75; \quad \frac{\partial E}{\partial V} = -63{,}83; \quad \frac{\partial E}{\partial R} = -87{,}24. \quad (25)$$

Тогда формула расчета абсолютной погрешности измерений модуля упругости примет вид:

$$\Delta_E = \sqrt{(47{,}75 \cdot 0{,}1)^2 + (-63{,}83 \cdot 0{,}1)^2 + (-87{,}24 \cdot 0{,}005)^2} = 8 \text{ ГПа}. \quad (26)$$

Относительная погрешность модуля упругости рассчитана в выражении (27). В качестве опорного значения модуля упругости E_{IT} принимается значение, полученное при номинальных параметрах ударного преобразователя:

$$\delta_H = 8 / 203{,}19 \cdot 100\ \% = 4\ \%. \quad (27)$$

Таким образом, при соблюдении требований к ударным преобразователям, установленных стандартами для твердомеров Либа, максимально допустимая относительная погрешность измерения методом ДИИ, связанная с отклонением параметров ударных преобразователей от номинальных, для твердости составит 2 %, а относительная погрешность измерения модуля упругости составит 4 %.

Заключение

В работе исследовалось влияние отклонения значений массы ударника, радиуса наконечника и скорости удара от номинальных на результат расчета твердости и модуля упругости при их измерении методом динамического инструментального индентирования. В результате исследования сформулированы следующие выводы.

Для массы: наибольшие отклонения твердости и модуля упругости от значения, полученного при номинальной массе ударника (5,45 г), составили 10 и 13,17 % соответственно при отклонении массы от номинальной на 10 %.

Для скорости: наибольшее отклонение модуля упругости от значения, полученного при номинальной скорости ударника (2,05 м/с), соста-

вило 7,03 % при отклонении скорости от номинальной на 10 %. Отклонения значения твердости не выявлено.

Для радиуса: наибольшее отклонение модуля упругости от значения, полученного при номинальном радиусе индентора (1,5 мм), составило 7,03 % при отклонении радиуса от номинального значения на 10 %. Наибольшее отклонение твердости составило 11,11 %.

Таким образом, при варьировании массы ударника, радиуса индентора и скорости удара наибольшее влияние в процентном отношении на результат расчета физико-механических характеристик оказала масса.

При нормировании требований к ударным преобразователям твердомеров ДИИ по аналогии с твердомерами Либа предельно допустимая относительная погрешность измерений для преобразователя тип D составляет для твердости 2 %, для модуля упругости 4 %.

Список литературы:

1. *Матюнин В.М., Марченков А.Ю., Каримбеков М.А. и др.* Развитие метода инструментального индентирования в диагностике физико-механических свойств упрочненных поверхностных слоев материалов и покрытий изделий машиностроения // Вестник Московского энергетического института. 2024. № 2. С. 166-175.
2. *Maksarov V.V., Nguyen V.D., Khalimonenko A.D., Shishkin P.V.* Technological support of workpiece surface quality based on local cryogenic impact during processing of austenitic steels // Chernye Metally. 2024. № 9. PP. 82-87.
3. *Malozyomov B.V., Martyushev N.V., Babyr N.V. et al.* Modelling of Reliability Indicators of a Mining Plant // Mathematics. 2024. Vol. 12. № 18. P. 2842.
4. *Назарычев А.Н., Мельникова О.С., Манукян Д.Д., Сафиуллин А.Х.* Оценка надежности автономных электростанций электротехнических комплексов газовой отрасли // Надежность и безопасность энергетики. 2025. Т. 18. № 1. С. 21-30.
5. *Umanskii A., Gogolinskii K., Syasko V., Golev A.* Modification of the Leeb Impact Device for Measuring Hardness by the Dynamic Instrumented Indentation Method // Inventions. 2022. Vol. 7. № 1. P. 29.
6. *Popov G.G., Bolobov V.I., Oparina A.O., Shvets A.O.* Effect of Hydrogenation on Hardness of Metallic Materials Used in Oil and Gas Industry // International Journal of Engineering. 2025. Vol. 38. № 2. PP. 295-303.
7. *Шибанов Д.А., Иванов С.Л., Емельянов А.А., Пумпур Е.В.* Оценка показателей работоспособности карьерных экскаваторов в реальных условиях эксплуатации // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2020. № 10. С. 86-94.
8. *Матюнин В.М., Марченков А.Ю., Горячкина М.В. и др.* Влияние масштабного фактора на модуль нормальной упругости стали, определяемый растяжением образцов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2023. Т. 89. № 8. С. 55-61.
9. *Oliver W.C., Pharr G.M.* Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: Advances in understanding and refinements to methodology // Journal of Materials Research. 2004. Vol. 19. № 1. PP. 3-20.
10. *Sudharshan Phani P., Oliver W.C., Pharr G.M.* Measurement of hardness and elastic modulus by load and depth sensing indentation: Improvements to the technique based on continuous stiffness measurement // Journal of Materials Research. 2021. Vol. 36. № 11. PP. 2137-2153.
11. *Ermakov B.S., Vologzhanina S.A., Ermakov S.B., Shvetsov O.V.* Causes of accelerated failure of excavator bucket teeth crowns when operating in Arctic regions // Chernye Metally. 2024. № 9. PP. 37-43.
12. *Maksarov V.V., Karenina R.A., Sinyukov M.S.* Improving the technology of finishing abrasive treatment in a magnetic field of the lock joint threaded surface of the structural alloy steel lock joint for drill rods // Chernye Metally. 2024. № 9. PP. 65-70.
13. *Ganzulenko O.Yu., Emelyanov A.V., Khangu Yu.E.* Calculation and experimental studies of the residual resource of long-term strength of alloyed heat-resistant steels // Chernye Metally. 2024. № 9. PP. 44-49.
14. *Ильинский А.В., Федоров А.В., Степанова К.А. и др.* Исследование динамической твердости конструкционных металлических материалов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2020. Т. 86. № 1. С. 57-61.
15. *Li C., Wang S., Fu X., Zhao J. et al.* A novel impact indentation technique with dynamic calibration method for measurement of dynamic mechanical properties // Journal of Materials Research and Technology. 2024. Vol. 30. PP. 4832-4846.
16. *Крень А.П., Протасеня Т.А.* Определение физико-механических характеристик изотропного пирографита по параметрам динамического индентирования // Дефектоскопия. 2014. № 7. С. 51-59.
17. *Gromyka D.S., Gogolinsky K.V., Shchiptsova E.K., Alekhnovich V.V.* Possibility Evaluation of Monitoring Areas of Local Plastic Deformation During Fatigue Wear of Metal Structures Using the Dynamic Instrumented Indentation Method // International Journal of Engineering. 2026. Vol. 39. № 1. PP. 104-111.
18. *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.
19. *Рабцевич А.В., Мацулевич О.В.* Новые возможности метода динамического индентирования в приборе «Импульс-2М» // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. 2007. Т. 29. № 2. С. 29-36.

20. *Канель Г.И., Гаркушин Г.В., Савиных А.С. и др.* Высокоскоростная деформация и разрушение стали 15Х2НМФА под действием ударной нагрузки при нормальной и повышенной температурах // Журнал технической физики. 2020. Т. 90. № 3. С. 441-449.
21. *Рудницкий В.А., Крень А.П., Ланцман Г.А.* Соотношение динамической и статической твердости металлов // Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-технических наук. 2016. № 4. С. 16-22.
22. *Болобов В.И., Плащинский В.А.* Влияние продолжительности удара на эффективность разрушения горных пород и пластического деформирования металлов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2022. № 3. С. 78-96.
23. *Spronk S.W.F., Kersemans M., De Baerdemaeker J.C.A. et al.* Comparing damage from low-velocity impact and quasi-static indentation in automotive carbon/epoxy and glass/polyamide-6 laminates // Polymer Testing. 2018. Vol. 65. PP. 231-241.
24. *Колганов О.А., Доронин К.И., Голев А.С.* Оптимизация параметров первичного преобразователя прибора динамического инструментального индентирования с дифференциальной катушкой // Дефектоскопия. 2024. № 6. С. 74-78.
25. *Колганов О.А., Ильинский А.В., Егоров Р.А. и др.* Дифференциальное включение катушек индуктивности для регистрации параметров движения ударника при динамическом индентировании // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2023. Т. 66. № 1. С. 74-80.
26. *Гоголинский К.В., Уманский А.С., Голев А.С. и др.* Анализ способов расчета модуля упругости при динамическом инструментальном индентировании // Дефектоскопия. 2024. № 7. С. 72-76.
27. ГОСТ Р 56474–2015 Системы космические. Контроль неразрушающий физико-механических свойств материалов и покрытий космической техники методом динамического индентирования. Общие требования.
28. *Peng G., Liu Y., Xu F., Jiang H., Jiang W., Zhang T.* On determination of elastic modulus and indentation hardness by instrumented spherical indentation: Influence of surface roughness and correction method // Materials Research Express. 2023. Vol. 10. № 8. P. 086503.
29. ГОСТ Р 8.969–2019 (ISO 16859-1:2015) Государственная система обеспечения единства измерений. Металлы и сплавы. Определение твердости по шкалам Либа. Часть 1. Метод измерений.
30. ГОСТ 9450–76 Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников.
31. ГОСТ Р 8.748–2011 (ISO 14577-1:2002) Металлы и сплавы. Измерение твердости и других характеристик материалов при инструментальном индентировании. Часть 1. Метод испытаний.
32. *Shen Z., Su Y., Liang Z., Long X.* Review of indentation size effect in crystalline materials: Progress, challenges and opportunities // Journal of Materials Research and Technology. 2024. Vol. 31. PP. 117-132.
33. *Li X., Zhang W., Han M., Xie F., Li D., Zhang J., Long B.* Indentation size effect: An improved mechanistic model incorporating surface undulation and indenter tip irregularity // Journal of Materials Research and Technology. 2023. Vol. 23. PP. 143-153.
34. *Shrestha P., Smedskjaer M.M., Bauchy M., Hoover C.G.* Impact of strain rate on the Indentation Size Effect: Evidence of an intimate link between Size effect, Strain Rate and Ductility in Soda-lime Silica glass // Journal of Non-Crystalline Solids. 2024. Vol. 637. P. 123031.
35. *Автономов Н.Н., Тололо А.В.* Влияние радиуса шара при исследовании материалов с помощью упругопластического индентирования // Новые материалы и технологии в космической технике. 2021. Т. 38. № 4. С. 227-232.
36. ISO 16859-2:2015 Metallic materials – Leeb hardness test – Part 2: Verification and calibration of the testing devices.
37. *Асланян А.Э., Асланян Э.Г., Гаврилкин С.М. и др.* Государственный первичный эталон твердости металлов по шкале Шора D и шкалам Либа ГЭТ 161-2019 // Измерительная техника. 2020. № 2. С. 6-10.

Кирилл Игоревич Доронин,
аспирант,
кафедра метрологии, приборостроения и управления качеством,
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II»,
Артем Сергеевич Голев,
аспирант,
кафедра теоретической и прикладной метрологии,
ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева»,
Александр Сергеевич Уманский,
канд. техн. наук, зав. кафедрой,
кафедра метрологии, приборостроения и управления качеством,
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II»,
Алена Вадимовна Мельникова,
аспирант,
кафедра теоретической и прикладной метрологии,
ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева»,
г. С.-Петербург,
e-mail: doronin.k.i@mail.ru