

DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-3-222-234

Контроль механических характеристик чугуна методом микроударного индентирования

А.П. Крень¹, Г.А. Ланцман¹, А.В. Никифоров², Н.К. Турсунов³, Т.Т. Уразбаев³

¹Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси,
ул. Академическая, 16, г. Минск 220072, Беларусь

²Белорусский государственный университет,
пр-т Независимости, 4, г. Минск 220030, Беларусь

³Ташкентский государственный транспортный университет,
ул. Темирийулчилар, 1, г. Ташкент 100167, Узбекистан

Поступила 14.05.2025

Принята к печати 02.09.2025

Инструментальное индентирование является одним из эффективных методов измерения физико-механических свойств различных материалов. В настоящей работе рассматриваются особенности контроля чугуна, имеющего различную форму графитовых включений: пластинчатую, шаровидную, вермикулярную и др., и модели, позволяющие на основании данных диаграммы микроударного нагружения материала рассчитать твёрдость по Бринеллю HBW , модуль упругости E и предел прочности σ_b чугунов различных марок. Показано, что использование в расчётах комплекса параметров позволяет устранить грубые ошибки при оценке HBW , вызванные влиянием графитовой структуры на значения модуля упругости и динамической твёрдости. На основании экспериментальных данных продемонстрировано, что измерение твёрдости чугуна с использованием значений коэффициента восстановления скорости приводит к погрешности измерения до 75 единиц, в связи с чем такой контроль с помощью стандартных динамических твердомеров является недостоверным. Также подтверждена устойчивая связь между пределом прочности и произведением твёрдости и модуля упругости. Показана возможность установления марки чугуна (серый или высокопрочный) по данным однократного измерения. Предложенная методика даёт возможность осуществить контроль непосредственно изделий на промышленных предприятиях, производящих чугунное литье. Проведенные исследования доказывают, что разработанные алгоритмы могут применяться для оперативной диагностики твёрдости чугуна с использованием динамических портативных твердомеров при их определённой модернизации.

Ключевые слова: чугун, динамическое индентирование, твёрдость по Бринеллю, предел прочности

Адрес для переписки:

Крень А.П.
Институт прикладной физики Национальной академии наук
Беларуси,
ул. Академическая, 16, г. Минск 220072, Беларусь
e-mail: aleksprk@iaph.bas-net.by

Для цитирования:

А.П. Крень, Г.А. Ланцман, А.В.Никифоров, Н.К. Турсунов, Т.Т. Уразбаев.
Контроль механических характеристик чугуна методом
микроударного индентирования.
Приборы и методы измерений.
2025. Т. 16. № 3. С. 222–234.
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-3-222-234

Address for correspondence:

Kren A.P.
Institute of Applied Physics of the National Academy of Science
of Belarus,
Akademicheskaya str., 16, Minsk 220072, Belarus
e-mail: aleksprk@iaph.bas-net.by

For citation:

Kren AP, Lantsman GA, Nikiforov AV, Tursunov NK, Urazbaev TT.
Control of Cast Iron Mechanical Properties Using Microimpact
Indentation Method.
Devices and Methods of Measurements.
2025;16(3):222–234. (In Russ.).
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-3-222-234

DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-3-222-234

Control of Cast Iron Mechanical Properties Using Microimpact Indentation Method

A.P. Kren¹, G.A. Lantsman¹, A.V. Nikiforov², N.K. Tursunov³, T.T. Urazbaev³

¹*Institute of Applied Physics of the National Academy of Science of Belarus,
Akademicheskaya str., 16, Minsk 220072, Belarus*

²*Belarusian State University,
Nezavisimosty Ave., 4, Minsk 220030, Belarus*

³*Tashkent State University of transport,
Temiryolchilar str., 1, Tashkent 100167, Uzbekistan*

Received 14.05.2025

Accepted for publication 02.09.2025

Abstract

Instrumental indentation is one of the effective methods for measuring the physical and mechanical properties of various materials. This paper discusses the features of testing cast iron with various forms of graphite inclusions: flake-like structure, spherical, vermicular, etc., and models that allow, based on the data of the micro-impact loading diagram of the material, to calculate the Brinell hardness HBW , the elastic modulus E and the tensile strength σ of cast iron of various grades. It is shown that the use of a set of different parameters in the calculations allows eliminating gross errors in assessing HBW caused by the influence of the graphite structure on the values of the elastic modulus and dynamic hardness. Based on experimental data, it is demonstrated that measuring the hardness of cast iron using the values of the restitution coefficient leads to a measurement error of up to 75 units. In this connection, such testing using standard dynamic hardness testers is unreliable. A stable relationship between the tensile strength and the product of hardness and elastic modulus is also confirmed. The possibility of establishing the cast iron grade (grey or spheroidal graphite iron) based on a single measurement is shown. The proposed method makes it possible the non-destructive testing of parts at industrial enterprises producing iron castings. The carried out studies prove that the developed algorithms can be used for express diagnostics of cast iron hardness using dynamic portable hardness testers with their certain modernization.

Keywords: cast iron, dynamic indentation, Brinell hardness, tensile strength

Адрес для переписки:

Крень А.П.
Институт прикладной физики Национальной академии наук
Беларуси,
ул. Академическая, 16, г. Минск 220072, Беларусь
e-mail: alekspk@iaph.bas-net.by

Для цитирования:

А.П. Крень, Г.А. Ланцман, А.В.Никифоров, Н.К. Турсунов, Т.Т. Уразбаев.
Контроль механических характеристик чугуна методом
микроударного индентирования.
Приборы и методы измерения.
2025. Т. 16. № 3. С. 222–234.
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-3-222-234

Address for correspondence:

Kren A.P.
Institute of Applied Physics of the National Academy of Science
of Belarus,
Akademicheskaya str., 16, Minsk 220072, Belarus
e-mail: alekspk@iaph.bas-net.by

For citation:

Kren AP, Lantsman GA, Tursunov NK, Urazbaev TT.
Control of Cast Iron Mechanical Properties Using Microimpact
Indentation Method.
Devices and Methods of Measurements.
2025;16(3):222–234. (In Russ.).
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-3-222-234

Введение

В настоящее время качество чугунного литья приобретает важное значение. Если ранее производители чугунных изделий проводили только выборочные проверки, а относительно высокий уровень дефектных деталей был допустимым, то сейчас из-за рыночного спроса на высокопрочный чугун и имеющуюся тенденцию на снижение веса деталей с использованием более низкого коэффициента запаса прочности, такой контроль становится неприемлемым. Из-за высокой конкуренции на мировом рынке, требуются только высококачественные изделия, поэтому практически вся продукция должна проходить контроль на соответствие установленным параметрам. Как правило, для этого необходимо выполнить два вида контроля:

1. Дефектоскопию – для обнаружения таких дефектов, как пористость, усадка, трещины и др.
2. Проверку структуры материала и физико-механических свойств, таких как предел прочности, твёрдость, модуль упругости.

Основные характеристики чугуна определяются формой и размерами графитовых включений, а также свойствами его металлической матрицы. Некоторые параметры формируются непосредственно в процессе затвердевания и не могут быть изменены, например, графитовая структура чугуна. Поэтому, если она не удовлетворяет установленным требованиям, то деталь необходимо отсортировать сразу после литья, что предотвратит любые дальнейшие затраты. В то же время, некоторые свойства могут быть в некоторой степени изменены процессом термической обработки. Таким образом, учитывая технические требования, следует выбрать подходящую точку для проведения испытаний на производственной линии и использовать соответствующее диагностическое оборудование для ранней отбраковки некачественных изделий.

В литературе известны работы по разбраковке серого и высокопрочного чугуна по скорости прохождения ультразвуковой волны [1], на основании значений которой фактически можно установить форму графита (пластинчатую или шаровидную). Однако использовать такие приборы для контроля механических характеристик достаточно сложно. В [2] показано, что для точного измерения механических свойств необходима

дополнительная информация или применение нескольких методов.

Более полные сведения о свойствах чугуна может дать инструментальное индентирование, заключающееся в записи кривой нагружения материала в координатах «глубина внедрения – контактное усилие» при вдавливании индентора в полупространство материала. Данная диаграмма несёт информацию об основных механических характеристиках. Однако для их определения необходима разработка соответствующих алгоритмов, которые могут отличаться в зависимости от природы материала. При этом индентирование может осуществляться как в ударном, так и статическом режиме. Динамическое внедрение будет обладать преимуществом в скорости оценки свойств и возможности проведения контроля в труднодоступных местах, что очень важно для контроля реальных изделий. В тоже время для эффективного использования метода необходимо решить ряд важных задач:

1. Выбрать оптимальные параметры индентирования, позволяющие учесть структурную неоднородность чугуна (энергию удара, диаметр индентора в зависимости от характерных размеров матрицы и включений графита).
2. Учесть особенности и факторы, влияющие на измерение статической твёрдости при использовании ударного нагружения.
3. Установить связи между характеристиками, измеряемыми при ударе и прочностью чугуна.

Изложенные выше положения позволили сформулировать цель настоящей работы – оценить возможность использования метода динамического инструментального индентирования для измерения твёрдости, модуля упругости и предела прочности чугуна, имеющего различную структуру и форму включений графита.

Теоретические положения

Включения графита могут иметь размеры от 15 до 1000 мкм для пластинчатого графита и 15–500 мкм для шаровидного. При этом нужно отметить, что крупные включения графита резко понижают механические свойства, и контроль характеристик для изделий из таких чугунов, как правило, не проводится. Если говорить о твёрдости чугунов по шкале

Бринелля *HBW*, то, как правило, она находится в диапазоне 100–500. При этом верхний диапазон соответствует белым чугунам. Устранить разброс показаний, вызванный структурной неоднородностью, очевидным образом можно за счёт создания большей деформации, увеличивая размеры индентора и величину предупредительной энергии. Однако это также должно быть разумным, поскольку создание большой деформации потребует увеличения размеров ударника твердомера и может сделать невозможным контроль деталей малой массы и размеров вследствие возникновения сильных вибраций при ударном контакте.

Распределение графита в структуре чугуна может быть как равномерным, так и неравномерным, а количество включений графита оценивается средним процентом площади, занятой на микрошлифе. Например, для пластинчатого графита плотность распределения обычно изменяется от 2 до 12 %. В [3] была исследована микроструктура реальных образцов чугуна и выполнена оценка распределения характерных размеров различных углеродных включений. В [4] предложен алгоритм построения кривой пластического течения чугуна на основе данных наноиндентирования, проводимого в различных точках для усреднения данных по структуре и свойствам. Используя эти результаты, можно утверждать, что для оценки физико-механических характеристик чугуна методом индентирования минимальный достаточный линейный размер области (поверхности) деформирования должен составлять порядка 350 мкм (для высокой твёрдости) и 500 мкм (для низкой). При этом, чтобы объективно охарактеризовать материал по твёрдости необходимо выполнить еще одно условие: он должен находиться в состоянии полной пластичности [5]. Для сферического индентора, схема внедрения которого показана на рисунке 1, это означает [6], что деформация ϵ_r должна находиться в диапазоне $0,04 < \epsilon_r < 0,12$. В этом случае зависимость среднего контактного давления (твёрдости) от прикладываемого усилия P примет практически постоянное значение, что позволяет в дальнейшем исключить влияние величины деформации на измеряемые характеристики и учитывать только влияние динамичности нагружения (скорости деформации).

Рисунок 1 отображает типичную диаграмму, в координатах «контактное усилие P – глубина вдавливания индентора h », получаемую при ударном внедрении, которая отличается от статической запаздыванием максимума перемещения по отношению к достижению максимума силы. Этот факт объясняется вязкими эффектами, которые металл проявляет при высоких скоростях деформации. Численные данные диаграммы служат для расчёта физико-механических характеристик.

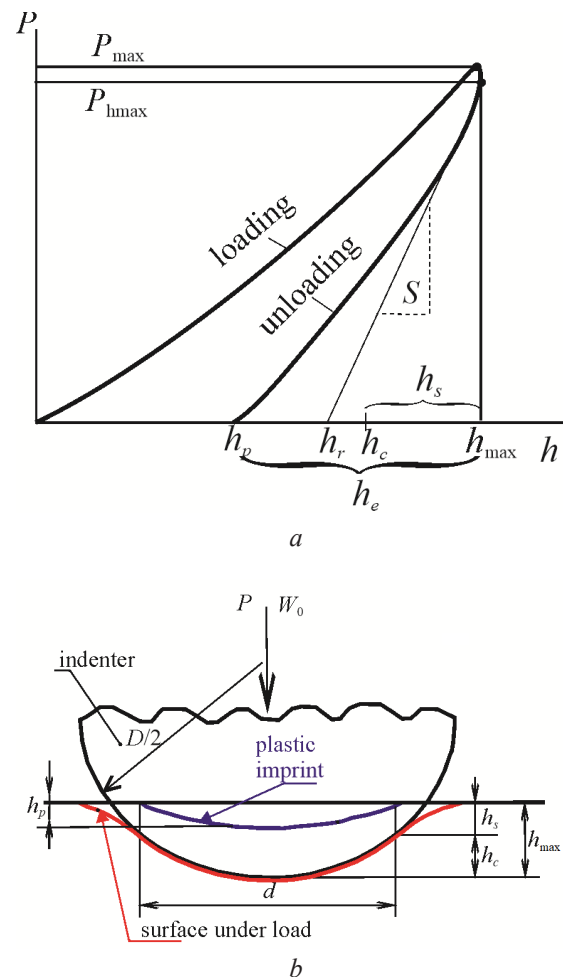


Рисунок 1 – Типичная диаграмма ударного вдавливания индентора в испытуемый материал (a) и схема контакта (b)

Figure 1 – Typical diagram of impact intrusion of an indenter into material tested (a) and imprint scheme (b)

Известно [7], что в состоянии полной пластичности при деформировании материала сферическим индентором величина эквивалентной деформации равна $\epsilon_r = 0,2d/D$. Здесь D – диаметр индентора; d – диаметр

отпечатка (рисунок 1). Следовательно, во всем диапазоне твёрдостей испытываемых чугунов должно выполняться неравенство:

$$0,2D < d < 0,6D. \quad (1)$$

Исходя из этого, выбор параметров нагружения заключается в подборе диаметра индентора D и предударной скорости индентора $V_{\max}$, при достижении которой диаметр отпечатка $d_{\min}$ будет соответствовать минимальному достаточному размеру области деформирования.

Величину $V_{\max}$, необходимую для достижения $d_{\min}$, можно определить из закона сохранения энергии, приравняв кинетическую энергию W_0 падающего индентора массой m и энергию деформирования материала индентором W_1 :

$$W_0 = 1/2 m V_{\max}^2. \quad (2)$$

Энергию деформирования материала определим путём интегрирования зависимости контактного усилия P от глубины внедрения h , которую на этапе нагрузки в первом приближении примем линейной (рисунок 1). При этом несовпадением $P_{\max}$ и $P_{h_{\max}}$ будем пренебрегать.

$$W_1 = \int_0^{h_{\max}} P dh = \frac{1}{2} P_{\max} h_{\max}. \quad (3)$$

Исходя из (2) и (3), предударная скорость индентора:

$$V_{\max} = \sqrt{\frac{P_{\max} h_{\max}}{m}}. \quad (4)$$

Глубину отпечатка $h_{\max}$ определим через его минимальный диаметр $d_{\min}$ из уравнения, полученного исходя из схемы отпечатка (рисунок 1) и приведённого в [8]:

$$h_{\max} = \frac{D}{2} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{d_{\min}^2}{D^2}} \right). \quad (5)$$

Значение $P_{\max}$, при котором диаметр отпечатка на материалах с различной твёрдостью достигнет требуемой величины $d_{\min}$, вычислим исходя из формулы для расчёта твёрдости по Бринеллю:

$$P_{\max} = \frac{HBW \cdot D^2 \left(1 - \sqrt{1 - \frac{d_{\min}^2}{D^2}} \right)}{0,102 \cdot 2}. \quad (6)$$

Как известно, с увеличением твёрдости испытуемого материала размер отпечатка на его поверхности уменьшается (при одной и той же энергии удара). Поэтому в первую очередь нужно на основании полученных уравнений определить энергию удара и предударную скорость, необходимую для создания $d_{\min}$ на изделиях с твёрдостью, соответствующей верхней границе рассматриваемого диапазона (500 HBW). Затем на основании полученной для этой твёрдости энергии удара нужно рассчитать фактический диаметр отпечатка d на материале с твёрдостью, соответствующей нижней границе рассматриваемого диапазона (100 HBW), и убедиться, чтобы этот диаметр соответствует неравенству (1).

В портативных приборах контроля предпочтительным является использование инденторов, которые являются наименьшими из размеров, предлагаемых в [8]. Расчёт и выбор предударной скорости индентора проведём для диаметров индентора 1 и 2 мм. Значение массы индентора примем равным 5 г, что соответствует массе инденторов, применяемых в большинстве портативных динамических твердомеров.

Результаты вычисления приведены в таблице. Данные таблицы показывают, что для оценки свойств чугуна подходят инденторы с диаметром как 1 мм, так и 2 мм. Для обоих вариантов можно подобрать энергию удара (предударную скорость), обеспечивающую достижение $d_{\min}$. Следует отметить, что для индентора с диаметром 1 мм требуемое значение $d = 350$ мкм и выше для твёрдости 500 HBW обеспечивается при энергии удара 7,7 мДж. При этом для твёрдости 100 HBW при этой же энергии отношение d/D составляет 0,51. Использование индентора с диаметром 2 мм при примерно той же энергии удара (6,29 мДж) позволяет увеличить диаметр отпечатка на твёрдых материалах до 400 мкм. Однако при этом значительно уменьшается глубина внедрения (с 41,7 до 20,2 мкм при твёрдости материала 500 HBW и с 70,7 до 45,2 мкм при твёрдости материала 100 HBW).

Таблица/Table

Результаты вычислений

Calculation results

HBW	d , мкм μm	d/D	h_{max} , мкм μm	W_0 , мДж mJ	V_{max} , м/с m/s
$D = 1 \text{ mm}$					
500	400	0.4	41.7	13.4	2.32
	350	0.35	31.6	7.7	1.76
100	582	0.58	93.3	13.4	2.32
	513	0.51	70.7	7.7	1.76
$D = 2 \text{ mm}$					
500	400	0.2	20.2	6.29	1.59
	350	0.175	15.4	3.67	1.21
100	594	0.30	45.2	6.29	1.59
	521	0.26	34.5	3.67	1.21

В то же время при использовании портативных твердомеров можно использовать любые промежуточные значения как D , так и V_{max} , ориентируясь при выборе на данные, приведённые в таблице. Главное условие – достижение достаточной чувствительности к изменению свойств чугуна, а также соблюдение неравенства (1).

Для того, чтобы определить статическую твёрдость по данным динамического индентирования, опишем процесс ударного вдавливания достаточно простыми выражениями и установим основные, влияющие на него, характеристики. За меру твёрдости испытуемого материала, если напряжения, создаваемые при ударе, выходят далеко за предел упругости, в портативных твердомерах принимают коэффициент восстановления скорости индентора $e = V_{\text{min}}/V_{\text{max}}$. Здесь V_{min} – скорость отскока индентора. Пусть кривая OF_A на рисунке 2 отображает усилие вдавливания в зависимости от глубины отпечатка h .

Как уже описывалось уравнениями (2) и (3), если кинетическая энергия до удара равна W_0 , то индентор вдавится в образец на такую глубину h_A , что площадь Oh_AF_A будет равняться W_0 . Во второй фазе удара, когда накопленная потенциальная энергия будет освобождаться, переходя в кинетическую энергию отскакивающего индентора, глубина отпечатка будет уменьшаться и сила взаимодействия между

образцом и индентором будет также убывать в соответствии с кривой F_AC на рисунке 2. Площадь $h_AF_A C$ равна упругой энергии, накопленной в инденторе и образце.

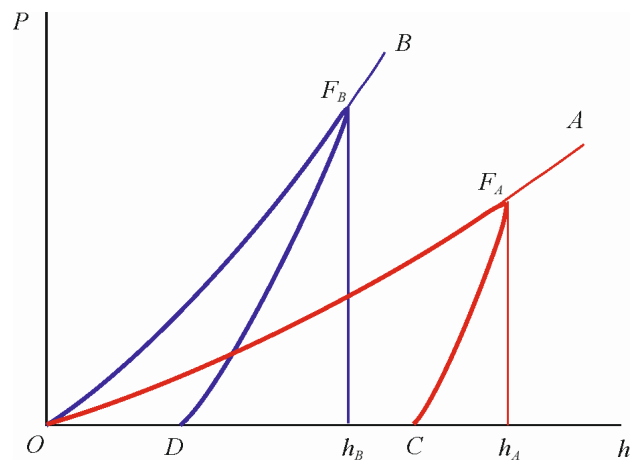


Рисунок 2 – Кривые динамического вдавливания индентора в образцы с различной твёрдостью

Figure 2 – Dynamic indentation curves of the indenter intrusion into the materials with different hardness

При вдавливании индентора в другой, более твёрдый материал, кривая вдавливания OF_B пройдет выше рассмотренной кривой OF_A . Если кинетическая энергия индентора при ударе будет по-прежнему равна W_0 , то глубина вдавливания h_B , будет меньше. Упругая энергия, которая вызывает отлёт индентора, выражается площадью $h_B F_B D$, которая значительно больше

площади $h_A F_A C$, если модуль упругости одинаков в обоих случаях. Для родственных материалов (например, для сталей разных марок) это условие соблюдается, и e изменяется пропорционально со статической твёрдостью, следовательно, может служить условным параметром твёрдости. Для материалов с различными модулями упругости динамическая твёрдость и e не будет находиться в постоянном соотношении со статической твёрдостью. Такая ситуация характерна для чугунов. Для чугуна с пластинчатым графитом модуль упругости может изменяться в диапазоне 80–150 МПа, а с шаровидным – 155–185 МПа [9].

В [10] показано, что среднее давление P_m на поверхности внутреннего соприкосновения двух упругих сфер диаметрами D и p равно:

$$P_m \approx HBW \approx \frac{16}{3\pi} \sqrt{\frac{15}{32} \frac{W_e}{(k_1 + k_2)^4} \left(\frac{2}{D} - \frac{2}{p}\right)^2}, \quad (7)$$

где W_e – работа упругой деформации; k_1 и k_2 – коэффициенты упругости обоих материалов, зависящие от модуля упругости E и коэффициента Пуассона ν :

$$k = 4 \frac{\nu^{-2} - 1}{\nu^{-2} E}. \quad (8)$$

Если сохранять D и $V_{\max}$ постоянными и использовать индентор из одного и того же материала, то e будет пропорционален потенциальной энергии упругого деформирования при ударе W_e и являться функцией статической твёрдости образца и модуля упругости образца:

$$e = f(HBW, E). \quad (9)$$

Таким образом можно утверждать, что для расчёта статической твёрдости HBW необходимо определить её как функцию двух переменных E и e .

Модуль упругости является важной характеристикой чугуна: в отличие от твёрдости, на него в меньшей степени влияет структура металлической основы и в большей степени его значение зависит от графитной составляющей. На этом факте основан ультразвуковой контроль чугуна. Рассчитать значения E по данным ударного индентирования можно исходя из следующих положений. Закон упругого деформирования не зависит от скорости приложения нагрузки, поэтому для вычисления E

воспользуемся выражениями, изложенными в [11], и учтём в формулах, что $P_{\max}$ и $P_{h_{\max}}$ не совпадают по величине. Приведённый модуль упругости E_r , который является функцией испытуемого материала и материала индентора, при динамическом индентировании вычисляется по формуле:

$$E_r = \frac{S\sqrt{\pi}}{2\sqrt{A}}. \quad (10)$$

В формулу (10) входит контактная жёсткость S , которая равна тангенсу угла наклона прямой на диаграмме вдавливания (рисунок 1), соединяющей точку $P_{h_{\max}}$ с точкой h_r на оси абсцисс h :

$$S = \frac{P_{h_{\max}}}{h_{\max} - h_r}. \quad (11)$$

Для сферического наконечника индентора:

$$h_{\max} - h_r = \frac{2}{3}(h_{\max} - h_p). \quad (12)$$

Площадь проекции отпечатка A в формуле (10) будет равна:

$$A = 2\pi R h_c. \quad (13)$$

При этом глубина контактного вдавливания в (13) рассчитывается по формуле:

$$h_c = h_{\max} - h_s. \quad (14)$$

Величина прогиба контура отпечатка h_s определяется из выражения:

$$h_s = 0,5 h_e = (h_{\max} - h_p). \quad (15)$$

Для расчёта такой важной характеристики как предел прочности воспользуемся связью между прочностью, модулем упругости и твёрдостью [9]:

$$\sigma_{\square} = k E_y HBW, \quad (16)$$

где k – коэффициент, зависящий от вида чугуна.

Изложенные положения содержат все необходимые сведения для экспериментальной проверки работоспособности метода динамического индентирования при испытании чугунов различных марок.

Оборудование

Индентирование с высокой скоростью деформации осуществлялось с помощью

оборудования, разработанного в Институте прикладной физики НАН Беларуси, позволяющего регистрировать текущую скорость индентора и всю кривую динамического нагружения (рисунок 3). Оборудование включает динамический портативный твердомер и электронный блок для регистрации и записи сигнала. Регистрация сигнала производилась по традиционной для динамических твердометров схеме с помощью катушки индуктивности. Далее осуществлялся переход от ЭДС к ско-

рости V , глубине внедрения h и контактному усилию P , развиваемому при ударе. Более подробно о способе регистрации кривой нагружения можно ознакомиться в [12, 13], где описан подробный алгоритм получения диаграммы нагружения, показанной на рисунке 1.

При испытаниях использовали пружину, позволяющую создать предударную скорость $\approx 1,9$ м/с, а также сферический индентор с диаметром $D = 1,8$ мм.

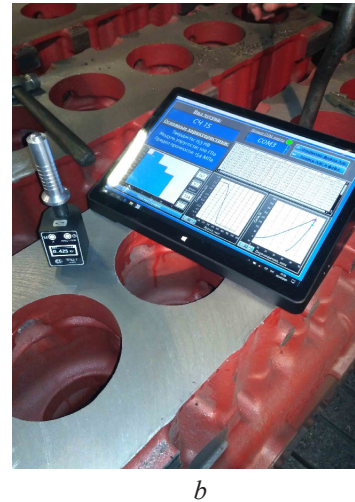
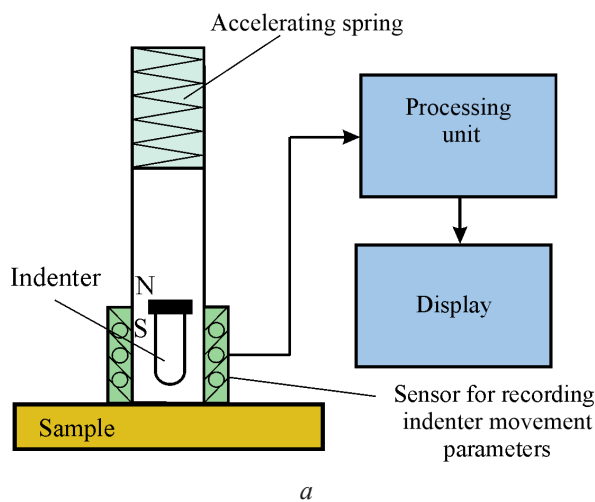


Рисунок 3 – Схема оборудования (a) и внешний вид прибора (b)

Figure 3 – Equipment diagram (a) and appearance of the device (b)

Истинные значения твёрдости по Бринеллю HBW получали с помощью статического твердомера Бринелля. При этом использовалась нагрузка $P = 7355$ Н и диаметр индентора 5 мм. Значение предела прочности образцов измеряли

с помощью универсальной испытательной машины (рисунок 4a). Образцы изготавливались согласно установленным требованиям (рисунок 4b). Измерения проводились без использования экстензометра.

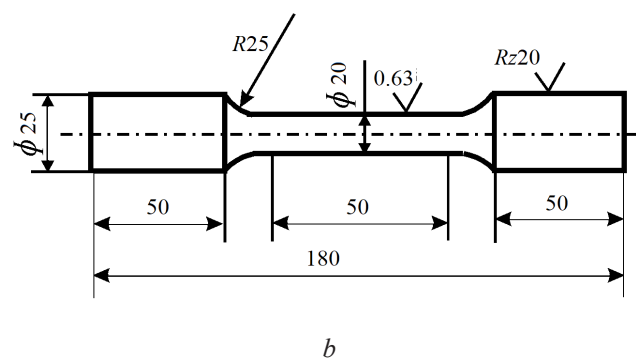


Рисунок 4 – Испытание образца в разрывной машине (a), размеры образца (b)

Figure 4 – Testing of a specimen in a tensile testing machine (a), specimen dimensions (b)

Материалы

Для проверки разработанных теоретических положений использовалось свыше 100 образцов чугунов различных производителей: Майдаковский литейный завод, Сукремльский литейный завод, Минский моторный завод, Минский тракторный завод, ОАО «То-

нар» и др. Чугуны имели различную форму и размеры графитовых включений. Типичные микроструктуры показаны на рисунке 5. В соответствии с проведёнными металлографическими исследованиями их можно было классифицировать как: чугун с пластинчатым, шаровидным, вермикулярным графитом и белые чугуны.

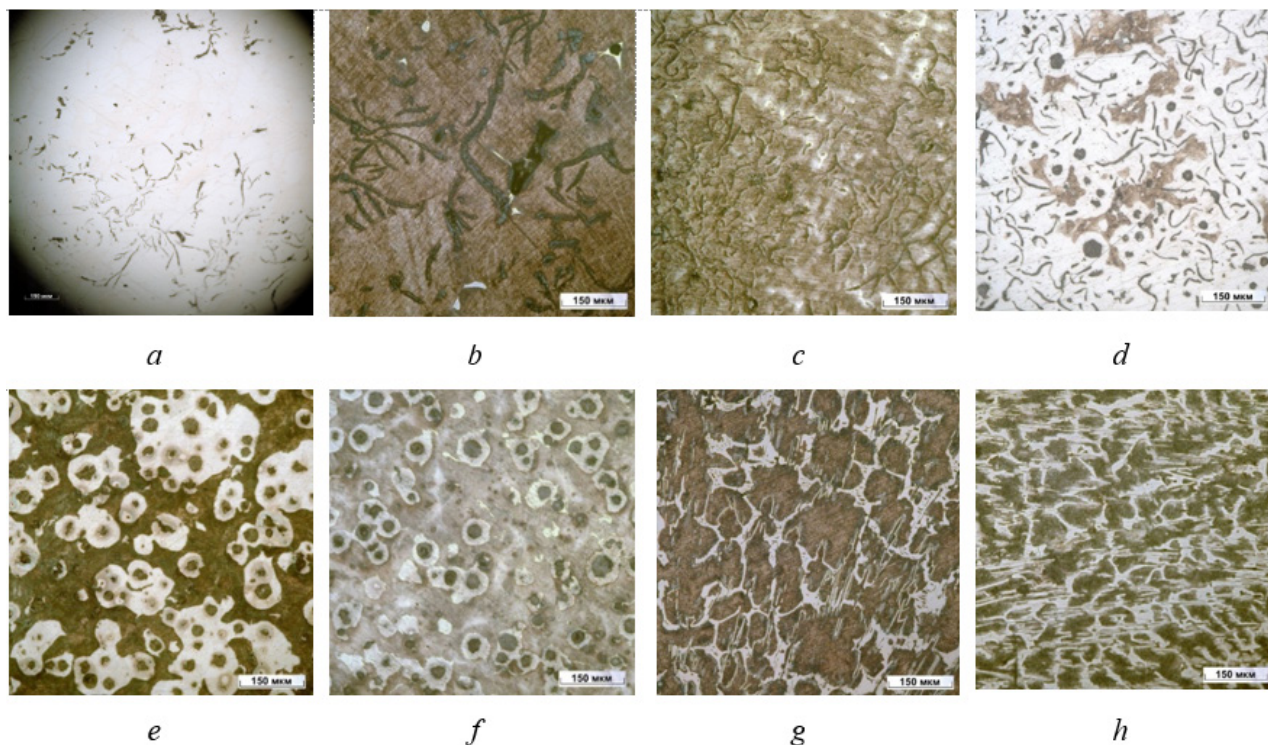


Рисунок 5 – Типичные структуры контролируемых чугунов: *a, b* – чугун с пластинчатым графитом; *c* – чугун с пластинчатым графитом, содержащий фосфидную эвтектику; *d* – с вермикулярным графитом; *e, f* – чугун с шаровидным графитом; *g, h* – белый чугун

Figure 5 – Typical structures of the tested cast irons: *a, b* – with lamellar graphite; *c* – with lamellar graphite containing phosphide eutectic; *d* – with vermicular graphite; *e, f* – with spheroidal graphite; *g, h* – white cast iron

Экспериментальные исследования и результаты

Измерения, проведённые на приборе, позволили определить коэффициент восстановления скорости e и приведённый модуль упругости E_r . На рисунках 6 и 7 приведены зависимости $HBW=f(e)$ и $HBW=f(e, E_r)$. Для выявления потенциальных проблем в расчётах и оценки соответствия значений, полученных расчётом, исходя из принятой модели, измеренным величинам также построен график отклонений (рисунок 8).

Как видно из графиков, точность определения статической твёрдости по Бринеллю

при использовании только значений e достаточно низкая: наблюдаются расхождения до 75 единиц. Твёрдость 40 % образцов определяется с погрешностью выше 15 единиц (допустимой величиной погрешности). Поэтому определение HBW исходя из значений e , по которым производится градуировка портативных твердомеров некоторых производителей, может привести к тому, что некачественная продукция попадет в дальнейшее производство или к потребителю. При расчёте статической твёрдости как функции двух переменных $HBW=f(e, E_r)$ отклонение свыше 15 единиц (16–30 единиц) имело 16 % образцов. При этом проведённый анализ

выбросов показал, что все они были вызваны анизотропией свойств по глубине образцов или изменением свойств поверх-

ности (металлической матрицы) в результате резки или охлаждения деталей при выплавке.

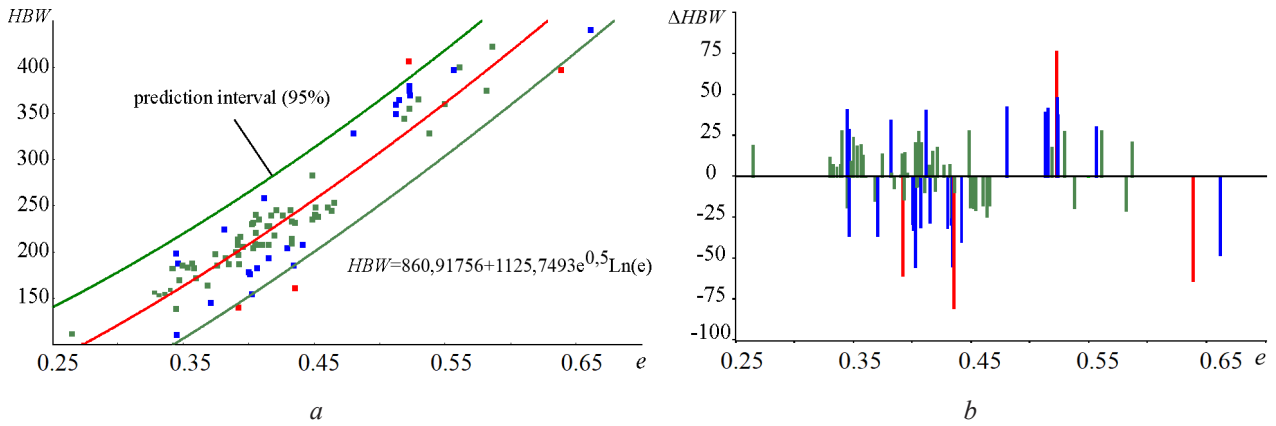


Рисунок 6 – Зависимость твёрдости по Бринеллю от коэффициента восстановления скорости (a) и погрешность измерения (b)

Figure 6 – Dependence of the Brinell hardness on the coefficient of speed recovery (a) and measurement error (b)

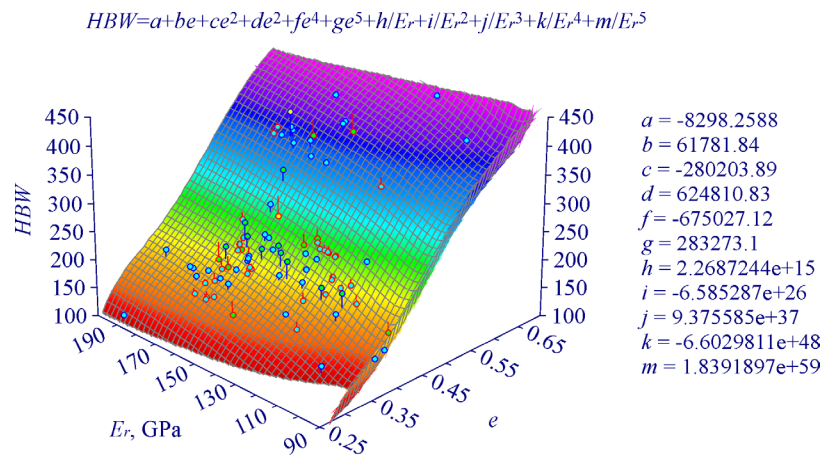


Рисунок 7 – Поверхность, описывающая связь $HBW = f(e, E_r)$

Figure 7 – Surface describing the dependence $HBW = f(e, E_r)$

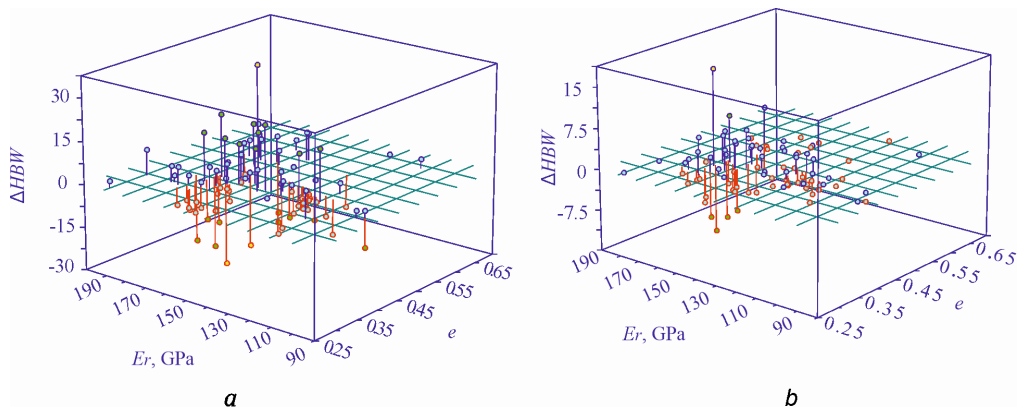


Рисунок 8 – Разница между измеренным и предсказанным значением твёрдости ΔHBW для всех образцов (a) и после исключения образцов с анизотропией свойств (b)

Figure 8 – Difference between measured and predicted hardness value ΔHBW for all samples (a) and after excluding samples with anisotropy (b)

Реальные значения глубины внедрения индентора, использовавшегося в приборе, составили от 32 до 49 мкм, а диаметра отпечатка – от 367 до 574 мкм при изменении твёрдости от 112 до 441 *HBW*. Этих значений достаточно, чтобы избежать влияния неоднородности структуры (как установлено ранее) на показания прибора и градуировочную зависимость, однако малая глубина внедрения не позволяет устранить влияние анизотропии, вызванной изменением свойств металлической матрицы. Холодная шлифовка поверхности на глубину до 1 мм позволила снизить погрешность измерения твёрдости большинства образцов до 10–15 единиц (рисунок 8b) по данным динамического индентирования. Образцы, для которых такого снижения не произошло (отклонение выше 15 единиц было выявлено только для 4 образцов), обладали

неоднородными свойствами по всей глубине отливки. Анизотропия свойств по всей отливке подтверждалась также измерениями статической твёрдости с меньшими нагрузками и диаметрами индентора ($D = 2,5$ мм и нагрузкой $P = 2452$ Н, а также $D = 1$ мм и $P = 294,2$ Н), которые показывали аналогичную тенденцию – твёрдость чугуна менялась в зависимости от нагрузки.

Для проверки возможности контроля предела прочности из материалов были случайным образом отобраны образцы с различной структурой (по данным металлографического контроля), обладающие достаточной однородностью (по данным измерения твёрдости). Эти образцы были испытаны на разрывной машине с получением значения предела прочности при разрыве. На рисунке 9 представлена зависимость предела прочности σ_B от произведения $HBW \cdot E_r$.

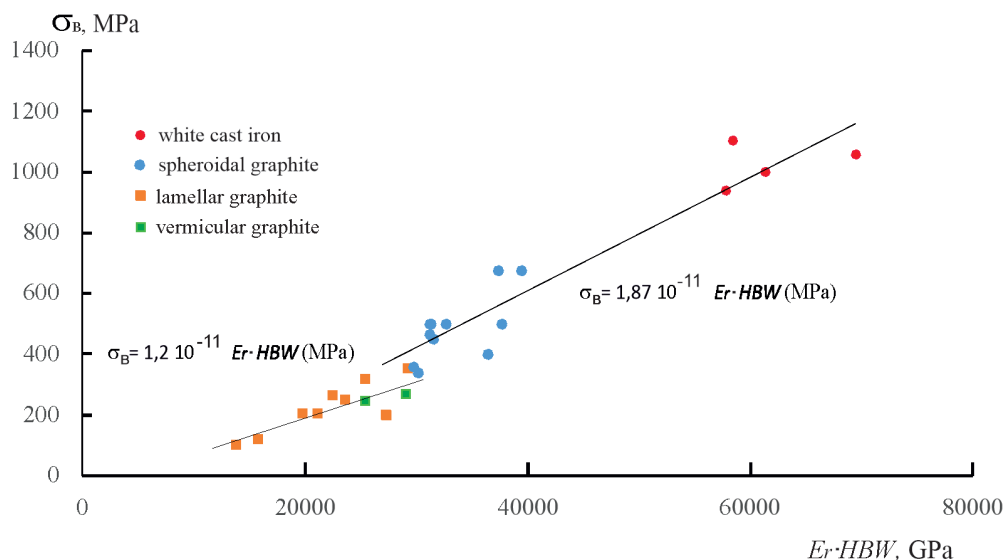


Рисунок 9 – Зависимости для определения предела прочности чугуна различных марок

Figure 9 – Dependencies for determining the tensile strength of cast iron of various grades

Как видно из рисунка 9 связь имеет устойчивый характер. При этом, если использовать для разграничения структуры чугуна получаемое значение модуля упругости (для серых чугунов $E_r < 150$ ГПа), то можно легко определить какой из прямых необходимо воспользоваться для расчёта предела прочности.

Закключение

Данные испытаний демонстрируют, что метод динамического инструментального инден-

тирования может успешно применяться для неразрушающего контроля чугуна. Установлены оптимальные энергетические и геометрические параметры индентирования: предударная скорость, масса, диаметр сферического индентора, позволяющие провести измерения статической твёрдости по Бринеллю. Показана недопустимость контроля твёрдости по данным коэффициента восстановления скорости. Теоретически и практически подтверждено, что повышение точности контроля может быть достигнуто путём использования для рас-

чёта твёрдости нескольких параметров – коэффициента восстановления скорости и модуля упругости. В этом случае модель позволяет оценить твёрдость изделий с погрешностью, допустимой при промышленном контроле – до 10–15 единиц *HBW*.

Измерение модуля упругости позволяет также оценить прочность чугуна, имеющего различную структуру, а также разграничить чугун по виду (серый или высокопрочный). Проведённые металлографические исследования подтверждают данный вывод.

Таким образом, можно утверждать, что метод динамического микроиндентирования может успешно применяться для контроля физико-механических характеристик чугуна. Он позволяет достаточно достоверно измерить твёрдость в диапазоне 90–450 *HBW*, модуль упругости 80–190 ГПа, предел прочности 100–1100 МПа.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований. Конкурс БРФФИ–МИРРУ 2023. Проект T23Y3B-035 «Изучение процессов структурообразования и локального деформирования чугунов с целью создания их улучшенных марок, методик и средств неразрушающего контроля физико-механических характеристик».

Список использованных источников

1. Баяв А.Р. [и др.] Возможности контроля структуры чугунных и стальных изделий по данным ультразвуковых измерений. *Литье и металлургия*. 2004;(2):85-89.
2. Ghaemi, M. Material, Structure and Hardness Testing of Cast-Iron Safety Parts by NDT Methods. 10th European Conference on Non-Destructive Testing, Moscow 2010, June 7-11. <https://www.ndt.net/?id=9347>
3. Анисович, А.Г. Микроструктуры черных и цветных металлов / А.Г. Анисович, А.А. Андрушкевич // Минск: Белорусская наука, 2015. – 131 с.
4. Jian Weng, Rebecca Lindvall, Kejia Zhuang, Jan-Eric Ståhl, Han Ding, Jinming Zhou A machine learning based approach for determining the stress-strain relation of grey cast iron from nanoindentation // *Mechanics of Materials*, Vol. 148, 2020, 103522.
DOI: 10.1016/j.mechmat.2020.103522

5. A. Kren, M. Delendik, A. Machikhin Non-destructive evaluation of metal plasticity using a single impact microindentation // *International Journal of Impact Engineering*. – 2022. – № 162. – p. 104141.

DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2021.10414

6. Johnson KL. *Contact Mechanics*. Cambridge: Cambridge University Press; 1985:448-452.

7. Chang, Chao, Garrido, M.A., Ruiz-Hervias, J., Zhang, Zhu, Zhang, Le-le, Representative Stress-Strain Curve by Spherical Indentation on Elastic-Plastic Materials, *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018, 8316384, 9 pages, 2018.

DOI: 10.1155/2018/8316384

8. D. Tabor. *Hardness of Metals*. Clarendon Press, Oxford, 1951.

9. Чугун : справочник / А.Д. Шерман и др.; Под ред. А.Д. Шермана, А.А. Жукова // М.: Металлургия, 1991, 576 с.

10. Динник А.Н. *Избранные труды*. – Киев: АН УССР, 1952. – Т. 1. – 151 с.

11. Anthony C. Fischer-Cripps. *Introduction to Contact Mechanics* Springer New York, NY, 226 p.

DOI: 10.1007/978-0-387-68188-7

12. Kren, A.P. Determination of the Strain-Hardening Exponent of a Metallic Material by Low-Speed Impact Indentation / A.P. Kren, V.A. Rudnitskii // *Russian Metallurgy (Metally)*. – 2019. – №. 4. – P. 478–483.

DOI: 10.1134/S0036029519040220

13. Kren A.P., Naumov A.O. Determination of the relaxation function for viscoelastic materials at low velocity impact // *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 37, Iss. 2, 2010, P. 170-176.

DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2009.08.001

Acknowledgments

The work was done with the support of Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research. Contest BRFFR-MIRRU 2023. Project T23Y3B-035 «Study of structure forming processes and local deformation of cast iron aiming at creating their improved grades, methods and tools of non-destructive testing of their physical and mechanical properties».

References

1. Bajev VR. [et al.]. Possibilities of the structure control of the cast-iron and steel articles by data of ultrasonic measuring. *Foundry production and metallurgy*. 2004;(2):85-89. (In Russ.).
2. Ghaemi M. Material, Structure and Hardness Testing of Cast-Iron Safety Parts by NDT Methods.

10th European Conference on Non-Destructive Testing, Moscow 2010, June 7-11. <https://www.ndt.net/?id=9347>

3. Anisovich AG, Andrushkevich AA. Microstructures of ferrous and non-ferrous metals. Minsk: Belarusian Science, 2015;131 p. (In Russ.).

4. Jian Weng, Rebecka Lindvall, Kejia Zhuang, Jan-Eric Ståhl, Han Ding, Jinming Zhou A machine learning based approach for determining the stress-strain relation of grey cast iron from nanoindentation. *Mechanics of Materials*. 2020;148:103522.

DOI: 10.1016/j.mechmat.2020.103522

5. Kren A, Delendik M, Machikhin A. Non-destructive evaluation of metal plasticity using a single impact microindentation. *International Journal of Impact Engineering*. 2022;(162):104141 p.

DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2021.10414

6. Johnson KL. *Contact Mechanics*. Cambridge: Cambridge University Press. 1985:448-452.

7. Chang Chao, Garrido MA, Ruiz-Hervias J, Zhang Zhu, Zhang Le-le. Representative Stress-Strain Curve by Spherical Indentation on Elastic-Plastic Materials, *Advances in Materials Science and Engineering*.

2018;8316384, 9 pages.

DOI: 10.1155/2018/8316384

8. Tabor D. *Hardness of Metals*. Clarendon Press, Oxford, 1951.

9. Sherman AD. [et al.]. *Cast iron: a reference book*. Edited by A.D. Sherman, A.A. Zhukov. M.: Metallurgy, 1991, 576 p. (In Russ.).

10. Dinnik A.N. *Selected works*. Kyiv: Academy of Sciences of the Ukrainian SSR. 1952;1:151 p. (In Russ.).

11. Anthony C. Fischer-Cripps. *Introduction to Contact Mechanics* Springer New York, NY, 226.

DOI: 10.1007/978-0-387-68188-7

12. Kren AP, Rudnitskii VA. Determination of the Strain-Hardening Exponent of a Metallic Material by Low-Speed Impact Indentation. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2019;(4):478–483. **DOI:** 10.1134/S0036029519040220

13. Kren AP, Naumov AO. Determination of the relaxation function for viscoelastic materials at low velocity impact. *International Journal of Impact Engineering*. 2010;37(2):170-176.

DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2009.08.001