

DOI: 10.21122/2220-9506-2026-17-2-151-163

Комплексная оценка механических свойств материалов методом инструментального индентирования на базе измерительного комплекса УИМ-1

К.В. Пантелеев¹, А.П. Крень², В.А. Микитевич¹, О.В. Мацулевич², Т.А. Протасеня²,
Г.А. Ланцман², Р.И. Воробей¹, О.К. Гусев¹, А.И. Свистун¹, А.К. Тявловский¹,
А.Л. Жарин¹

¹Белорусский национальный технический университет,
пр-т Независимости, 65, г. Минск 220013, Беларусь

²Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси,
ул. Академическая, 16, г. Минск 220072, Беларусь

Поступила 24.03.2026

Принята к печати 01.06.2026

Традиционные разрушающие методы контроля механических свойств материалов требуют изготовления образцов, что исключает их применение для оценки готовых изделий. Актуальной задачей является развитие неразрушающих методов контроля, обеспечивающих достоверную оценку широкого спектра характеристик материалов. Целью работы было представление функциональных возможностей разработанного измерительного комплекса УИМ-1 для комплексного исследования механических свойств материалов методом инструментального индентирования. Метод основан на непрерывной регистрации диаграммы «контактное усилие – глубина внедрения». Комплекс оснащён приводом с нагрузкой до 2000 Н, тензометрическим датчиком силы (погрешность $\leq \pm 1\%$), фотоэлектрическим датчиком перемещения (разрешение 0,1 мкм). Реализованы методики согласно ISO 14577-1, СТБ 2495-2017, ГОСТ 22761-77, ГОСТ 22762-77. Анализ диаграммы индентирования позволяет определять твёрдость по Бринеллю и Роквеллу без оптического измерения отпечатка, модуль упругости (70–200 ГПа), предел прочности (380–1700 МПа), ползучесть, релаксацию, пластичность и коэффициент анизотропии. Комплекс УИМ-1 является универсальным инструментом неразрушающего контроля, обеспечивающим в рамках одного испытания получение комплекса механических характеристик материалов.

Ключевые слова: инструментальное индентирование, твёрдость по Бринеллю, твёрдость по Роквеллу, модуль упругости, неразрушающий контроль

Адрес для переписки:

Пантелеев К.В.
Белорусский национальный технический университет,
пр-т Независимости, 65, г. Минск 220013, Беларусь
e-mail k.pantsialeu@bntu.by

Address for correspondence:

Pantsialeu K.U.
Belarusian National Technical University,
Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus
e-mail k.pantsialeu@bntu.by

Для цитирования:

К.В. Пантелеев, А.П. Крень, В.А. Микитевич, О.В. Мацулевич,
Т.А. Протасеня, Г.А. Ланцман, Р.И. Воробей, О.К. Гусев,
А.И. Свистун, А.К. Тявловский, А.Л. Жарин.
Комплексная оценка механических свойств материалов методом
инструментального индентирования на базе измерительного
комплекса УИМ-1.
Приборы и методы измерений.
2026. Т. 17. № 2. С. 151–163.
DOI: 10.21122/2220-9506-2026-17-2-151-163

For citation:

Kanstantsin Pantsialeu, Alexander Kren, Vladimir Mikitevich,
Oleg Matsulevich, Tatsiana Protaseny, German Lantsman,
Roman Vorobei, Oleg Gusev, Aliaksandr Svistun, Andrey Tyavlovsky,
Anatoly Zharin.
UIM-1 Measuring Complex for Comprehensive Evaluation
of Mechanical Properties of Materials by Instrumented Indentation.
Devices and Methods of Measurements.
2026;17(2):151–163. (In Russ.).
DOI: 10.21122/2220-9506-2026-17-2-151-63

DOI: 10.21122/2220-9506-2026-17-2-151-163

UIM-1 Measuring Complex for Comprehensive Evaluation of Mechanical Properties of Materials by Instrumented Indentation

Kanstantsin Pantsialeu¹, Alexander Kren², Vladimir Mikitevich¹, Oleg Matsulevich², Tatsiana Protasenya², German Lantsman², Roman Vorobei¹, Oleg Gusev¹, Aliaksandr Svistun¹, Andrey Tyavlovsky¹, Anatoly Zharin¹

¹Belarusian National Technical University,
Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus

²Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus,
Akademicheskaya str., 16, Minsk 220072, Belarus

Received 24.03.2026

Accepted for publication 01.06.2026

Abstract

Traditional destructive methods for evaluating the mechanical properties of materials require the preparation of test specimens, which precludes their application for assessing finished products. Thus, the development of non-destructive testing that provide reliable evaluation of a wide range of properties is a relevant task. Aim of this work was to present the functional capabilities and confirm the effectiveness of the developed UIM-1 measuring system for comprehensive study of mechanical properties of materials using the instrumented indentation method. Method is based on the continuous recording of the "contact force – penetration depth" diagram. The system is equipped with an actuator providing a load of up to 2000 N, a strain gauge force sensor (error $\leq \pm 1\%$), and a photoelectric displacement sensor (resolution 0.1 μm). The implemented measurement procedures comply with ISO 14577-1, STB 2495-2017, GOST 22761-77 and GOST 22762-77. Analysis of the indentation diagram allows determining Brinell and Rockwell hardness without optical measurement of the imprint, elastic modulus (70–200 GPa), ultimate tensile strength (380–1700 MPa), creep, relaxation, plasticity and anisotropy coefficient. The UIM-1 system is a versatile non-destructive testing tool that provides a set of interrelated mechanical characteristics of materials within a single test.

Keywords: instrumented indentation, Brinell hardness, Rockwell hardness, elastic modulus, non-destructive testing

Адрес для переписки:

Пантелеев К.В.
Белорусский национальный технический университет,
пр-т Независимости, 65, г. Минск 220013, Беларусь
e-mail k.pantsialeu@bntu.by

Address for correspondence:

Pantsialeu K.U.
Belarusian National Technical University,
Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus
e-mail k.pantsialeu@bntu.by

Для цитирования:

К.В. Пантелеев, А.П. Крень, В.А. Микитевич, О.В. Мацулевич, Т.А. Протасеня, Г.А. Ланцман, Р.И. Воробей, О.К. Гусев, А.И. Свистун, А.К. Тявловский, А.Л. Жарин.
Комплексная оценка механических свойств материалов методом инструментального индентирования на базе измерительного комплекса УИМ-1.
Приборы и методы измерений.
2026. Т. 17. № 2. С. 151–163.
DOI: 10.21122/2220-9506-2026-17-2-151-163

For citation:

Kanstantsin Pantsialeu, Alexander Kren, Vladimir Mikitevich, Oleg Matsulevich, Tatsiana Protasenya, German Lantsman, Roman Vorobei, Oleg Gusev, Aliaksandr Svistun, Andrey Tyavlovsky, Anatoly Zharin.
UIM-1 Measuring Complex for Comprehensive Evaluation of Mechanical Properties of Materials by Instrumented Indentation.
Devices and Methods of Measurements.
2026;17(2):151-163. (In Russ.).
DOI: 10.21122/2220-9506-2026-17-2-151-163

Введение

Современное материаловедение и инженерная практика предъявляют высокие требования к достоверности и информативности методов контроля физико-механических свойств материалов. Традиционные разрушающие методы испытаний, хотя и являются эталонными, обладают рядом ограничений, в частности, требуют изготовления образцов для испытаний. Поэтому, традиционные методы неприменимы для контроля готовых изделий и не всегда позволяют оценить поведение материала в условиях, приближенных к реальной эксплуатации [1–4]. В связи с этим возрастает роль неразрушающих методов, среди которых особое место занимает инструментальное индентирование [2, 5].

Метод инструментального индентирования основан на непрерывной регистрации диаграммы вдавливания индентора в координатах «контактное усилие – глубина внедрения». Анализ указанной диаграммы позволяет извлечь информацию не только о твёрдости, но и о модуле упругости, характеристиках прочности, пластичности, ползучести, релаксации и анизотропии материалов [3–10]. Измерительный комплекс, разработанный в Институте прикладной физики Национальной академии наук Беларуси совместно с Белорусским национальным техническим университетом, реализует полный цикл таких исследований, объединяя в себе прецизионную механическую часть, современную систему управления и специализированное программное обеспечение [3, 4].

Целью настоящей работы являлось представление функциональных возможностей разработанного измерительного комплекса УИМ-1 для комплексного исследования механических свойств материалов методом инструментального индентирования.

Физические принцип инструментального индентирования

В основе метода инструментального индентирования лежит контролируемое локальное контактное взаимодействие жёсткого индентора известной геометрии с поверхностью исследуемого материала. В отличие от классических методов измерения твёрдости,

фиксирующих лишь конечный результат вдавливания, инструментальное индентирование предполагает непрерывную регистрацию полного цикла нагружения и разгрузки, что позволяет получить количественную информацию о кинетике упругопластического деформирования материала в реальном времени [2, 4, 5, 11, 12]. В процессе испытания одновременно измеряются прилагаемая к индентору сила и глубина его внедрения, формируя диаграмму «нагрузка – глубина вдавливания», которая представляет собой интегральную характеристику механического отклика материала.

Физическая сущность метода заключается в том, что процесс вдавливания индентора сопровождается сложным полем напряжений, локализованным в подповерхностной области. При этом материал последовательно проходит стадии упругого деформирования, пластического течения и упругого восстановления после снятия нагрузки. Переход от упругого к упругопластическому контакту описывается теорией Герца, которая устанавливает связь между геометрией индентора, модулем упругости материала и параметрами контактного взаимодействия. При превышении предела текучести в зоне контакта формируется область пластической деформации, размеры и форма которой определяются как свойствами материала, так и условиями нагружения. Необратимые изменения структуры материала, связанные с дислокационной динамикой, фазовыми превращениями или релаксационными процессами, находят отражение в виде остаточной глубины отпечатка после полной разгрузки.

Анализ полной диаграммы нагружения позволяет разделить общую работу деформирования на упругую и пластическую составляющие, а также оценить контактную жесткость системы «индентор – материал» [2, 5, 11]. Контактная жесткость, определяемая по начальному наклону кривой разгрузки, является ключевым параметром, связывающим экспериментально измеряемые величины с фундаментальными механическими характеристиками. На её основе, с использованием известных соотношений для контактной механики, рассчитываются приведённый модуль упругости и, после учёта упругих свойств индентора, модуль упругости исследуемого

материала. Твёрдость при инструментальном индентировании определяется как отношение максимальной приложенной нагрузки к площади проекции контактной поверхности, что исключает необходимость оптического измерения отпечатка и позволяет проводить испытания даже на материалах с выраженным упругим восстановлением [12].

Таким образом, метод инструментального индентирования реализует количественный подход к оценке механических свойств, базирующийся на фундаментальных принципах контактной механики и физики пластической деформации. Непрерывная регистрация процесса вдавливания обеспечивает возможность определения не только традиционных характеристик твёрдости, но и модуля упругости, параметров ползучести и релаксации, а также, при использовании соответствующих корреляционных или аналитических моделей, оценку предела текучести и предела прочности материала [5–8]. Поэтому данный метод является универсальным инструментом для изучения упругопластического поведения конструкционных материалов в широком диапазоне масштабов и условий нагружения.

Техническое оснащение и характеристики измерительного комплекса

Измерительный комплекс УИМ-1 (рисунок 1) представляет собой специализированное средство измерений, реализующее метод инструментального индентирования для определения физико-механических характеристик конструкционных материалов. Комплекс выполнен как законченное техническое решение, объединяющее прецизионное электро-механическое нагружающее устройство, систему сбора и обработки измерительной информации, а также специализированное программное обеспечение, обеспечивающее управление процессом испытаний, регистрацию экспериментальных данных и их последующую интерпретацию в соответствии с требованиями нормативной документации.

Основу конструкции составляет жёсткая станина (14), установленная на основании (15), к которой закреплены вертикальные направляющие (8). По направляющим перемещается каретка (5), приводимая в движение силовым приводом (1), включающим шаговый

двигатель (2), редуктор (3) и шариковинтовую передачу (9). Шаговый двигатель управляется драйвером (4), входящим в состав электронного блока обработки сигналов и управления (18). Такая кинематическая схема обеспечивает высокую точность позиционирования индентора относительно поверхности образца и стабильность задаваемой скорости нагружения в широком диапазоне. Контроль крайних положений каретки осуществляется концевыми выключателями верхнего и нижнего положения (17), сигналы от которых поступают в блок управления для автоматической остановки привода и предотвращения аварийных ситуаций.

На каретке (5) закреплён измерительный модуль, в котором интегрированы датчики силы и перемещения. Передача усилия от привода к индентору осуществляется через пружину (10), установленную между кареткой и узлом крепления индентора (6). Применение пружины позволяет реализовать управление нагрузкой по деформации упругого элемента и обеспечивает плавность нагружения на этапе контакта индентора с образцом. Индентор (7) закрепляется в узле крепления с помощью установочного винта (11), что обеспечивает возможность быстрой смены инденторов различной геометрии (шаровых, конических, пирамидальных) в зависимости от решаемой измерительной задачи.

В качестве первичного преобразователя силы используется тензометрический датчик нагрузки (12) (мостовой тензометрический преобразователь НМ2D4), установленный в измерительном модуле и воспринимающий усилие, передаваемое через пружину. Датчик обеспечивает измерение нагрузки в диапазоне до 2000 Н, что соответствует требованиям стандартизованных испытаний на твёрдость по шкалам Бринелля и Роквелла. Аналоговый сигнал с тензометрического моста поступает на аналого-цифровой преобразователь датчика нагрузки (19) (24-разрядный сигма-дельта АЦП AD7190), интегрированный в состав блока электроники, что позволяет достичь высокой точности измерения силы.

Для измерения глубины внедрения индентора используется фотоэлектрический датчик перемещения (13), жёстко закреплённый на оправке с индентором. Такое конструктивное решение позволяет

регистрировать истинное перемещение индентора независимо от деформаций элементов привода и упругих деформаций пружины. Датчик обладает разрешающей способностью 0,1 мкм и обеспечивает измерение перемещений в диапазоне, достаточном для проведения испытаний как на макро-, так и на микроуровне.

Определение момента касания индентором поверхности образца (16) реализуется на основе

анализа показаний тензометрического датчика нагрузки (12): появление усилия сопротивления, превышающего пороговое значение 2 Н, служит сигналом для остановки подвода и обнуления отсчёта глубины внедрения. При превышении порога 4 Н в первом отсчёте после касания процесс автоматически прерывается с выдачей сообщения оператору о необходимости снижения скорости подвода.

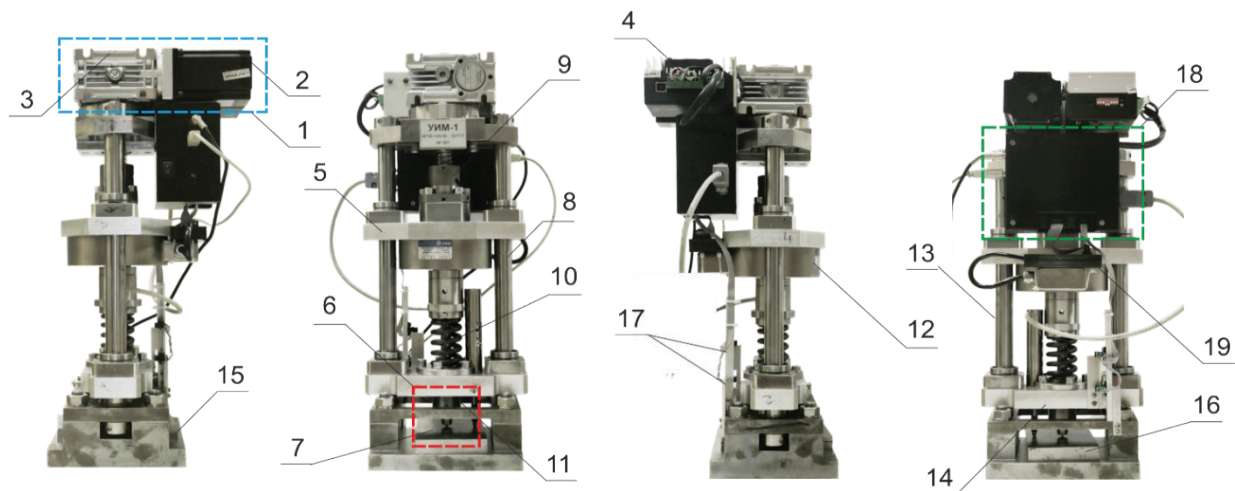


Рисунок 1 – Общий вид и обозначение основных узлов и компонентов измерительного комплекса УИМ-1: 1 – силовой привод; 2 – шаговый двигатель; 3 – редуктор шагового двигателя; 4 – драйвер шагового двигателя силового привода; 5 – каретка; 6 – узел крепления индентора; 7 – индентор; 8 – направляющие; 9 – шариковинтовая передача; 10 – пружина; 11 – установочный винт; 12 – тензометрический датчик нагрузки; 13 – фотоэлектрический датчик перемещения; 14 – станина; 15 – основание; 16 – образец; 17 – концевые выключатели верхнего и нижнего положения каретки; 18 – электронный блок обработки сигналов и управления; 19 – АЦП датчика нагрузки

Figure 1 – General view and designation of the main components of the UIM-1 measuring complex: 1 – power drive; 2 – stepper motor; 3 – stepper motor gearbox; 4 – stepper motor driver of the power drive; 5 – carriage; 6 – indenter mounting unit; 7 – indenter; 8 – guides; 9 – ball screw drive; 10 – spring; 11 – set screw; 12 – strain gauge force sensor; 13 – photoelectric displacement sensor; 14 – frame; 15 – base; 16 – specimen; 17 – upper and lower carriage limit switches; 18 – signal processing and control electronic unit; 19 – load sensor ADC

Электронный блок обработки сигналов и управления (18), выполненный на базе микроконтроллера, осуществляет приём команд от персонального компьютера через интерфейс USB, формирование управляющих сигналов для драйвера шагового двигателя (4), а также сбор и первичную обработку данных от тензометрического датчика нагрузки (12) и фотоэлектрического датчика перемещения (13). Система управления поддерживает два режима нагружения: с постоянной скоростью

перемещения индентора (регулирование по каналу датчика перемещения) и с постоянной скоростью изменения нагрузки (регулирование по каналу датчика силы), что обеспечивает гибкость при проведении испытаний материалов с различными реологическими свойствами.

Управление процессом испытаний осуществляется через специализированное программное обеспечение (рисунки 2–6).

Основные технические характеристики комплекса приведены в таблице.

Таблица / Table

Технические характеристики измерительного комплекса УИМ-1

Technical specifications of the UIM-1 measuring complex

Параметр / Parameter	Значение / Характеристика Value / Characteristic
Параметры установки / Installation parameters	
Максимальная нагрузка Maximum load	до 2000 Н up to 2000 N
Глубина внедрения индентора Indenter penetration depth	до 1 мм up to 1 mm
Набор сменных инденторов Set of interchangeable indenters	сферические (Ø 1; 2,5; 5; 10 мм), алмазный конус (HRC), пирамида Викерса, клин (для анизотропии) spherical (Ø 1; 2.5; 5; 10 mm), Rockwell diamond cone, Vickers pyramid, wedge (for anisotropy)
Точность измерения нагрузки Load measurement accuracy	относительная погрешность $\leq \pm 1\%$ relative error $\leq \pm 1\%$
Точность измерения перемещения Displacement measurement accuracy	абсолютная погрешность $\leq \pm 1$ мкм absolute error $\leq \pm 1$ μm
Скорость нагружения, в диапазоне Loading rate range	1–100 мкм/с 1–100 $\mu\text{m/s}$
Масса, не более Weight, max	20 кг 20 kg
Габаритные размеры (Д×Ш×В), не более Overall dimensions (L×W×H), max	400×300×700 мм 400×300×700 mm
Диапазоны определяемых характеристик / Measured characteristic ranges	
Твёрдость по Бринеллю (HB) Brinell hardness (HB)	100–450 HB
Твёрдость по Роквеллу (HRC) Rockwell hardness (HRC)	20–68 HRC
Модуль упругости (модуль Юнга) Elastic modulus (Young's modulus)	70–200 ГПа 70–200 GPa
Предел прочности сталей перлитного класса* Ultimate tensile strength of pearlitic steels*	380–1700 МПа 380–1700 MPa
Возможность определения параметров согласно СТБ 2495-2017 Capability to determine parameters according to STB 2495-2017	ползучесть (CIT), релаксация (RIT), пластичность, коэффициент анизотропии creep (CIT), relaxation (RIT), plasticity, anisotropy coefficient

*Примечание: определяется пересчётом по эмпирическим зависимостям на основании измеренной твёрдости (например, согласно ГОСТ 22761).

*Note: determined by recalculation using empirical correlations based on measured hardness (e. g., according to GOST 22761-77).

Структура измерительных методик

Измерительные методики, реализуемые УИМ-1, базируются на требованиях международных и национальных стандартов: ISO 14577-1, СТБ 2495-2017, а также на корреляционных зависимостях, установленных в ГОСТ 22761-77 и ГОСТ 22762-77 для оценки предела прочности и предела текучести по результатам вдавливания. Особенностью реализуемых методик является использование единой экспериментальной базы – диаграммы индентирования, получаемой при статическом нагружении образца.

1. *Измерение твёрдости и модуля упругости.* Данная методика является основополагаю-

щей и предназначена для получения первичных механических характеристик материала путём анализа полной диаграммы нагружения и разгрузки. В ходе испытания, проводимого со сферическим индентором (метод Бринелля) или алмазным конусом (метод Роквелла), система автоматически регистрирует кривую зависимости усилия F от глубины внедрения h . На основе геометрических параметров индентора и анализа кривой разгрузки, в частности определения контактной жёсткости как производной усилия по глубине внедрения, комплекс рассчитывает значения твёрдости по соответствующим шкалам [12]. Результаты измерений твёрдости по Бринеллю и Роквеллу приведены на рисунках 2 и 3, соответственно.

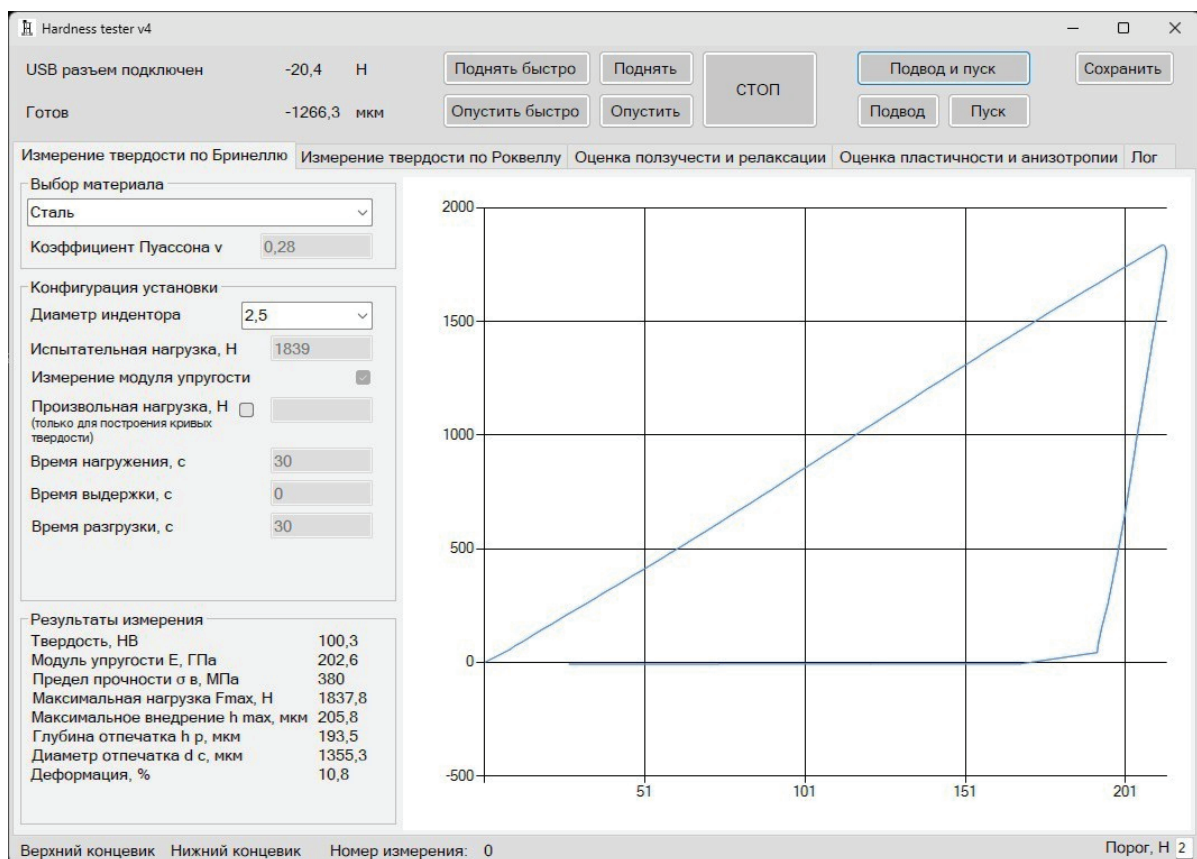


Рисунок 2 – Отображение результата измерения твёрдости по Бринеллю и определения модуля упругости, предела прочности, глубины и диаметра отпечатка, деформации по диаграмме нагружения

Figure 2 – Display of Brinell hardness measurement results and determination of elastic modulus, ultimate tensile strength, imprint depth and diameter, and strain from the loading diagram

Твёрдость по Бринеллю определяют путём статического вдавливания сферического индентора (шарика из твёрдого сплава)

в поверхность образца. Испытания проводят при нормированных нагрузках в соответствии с СТБ ISO 6506-1.

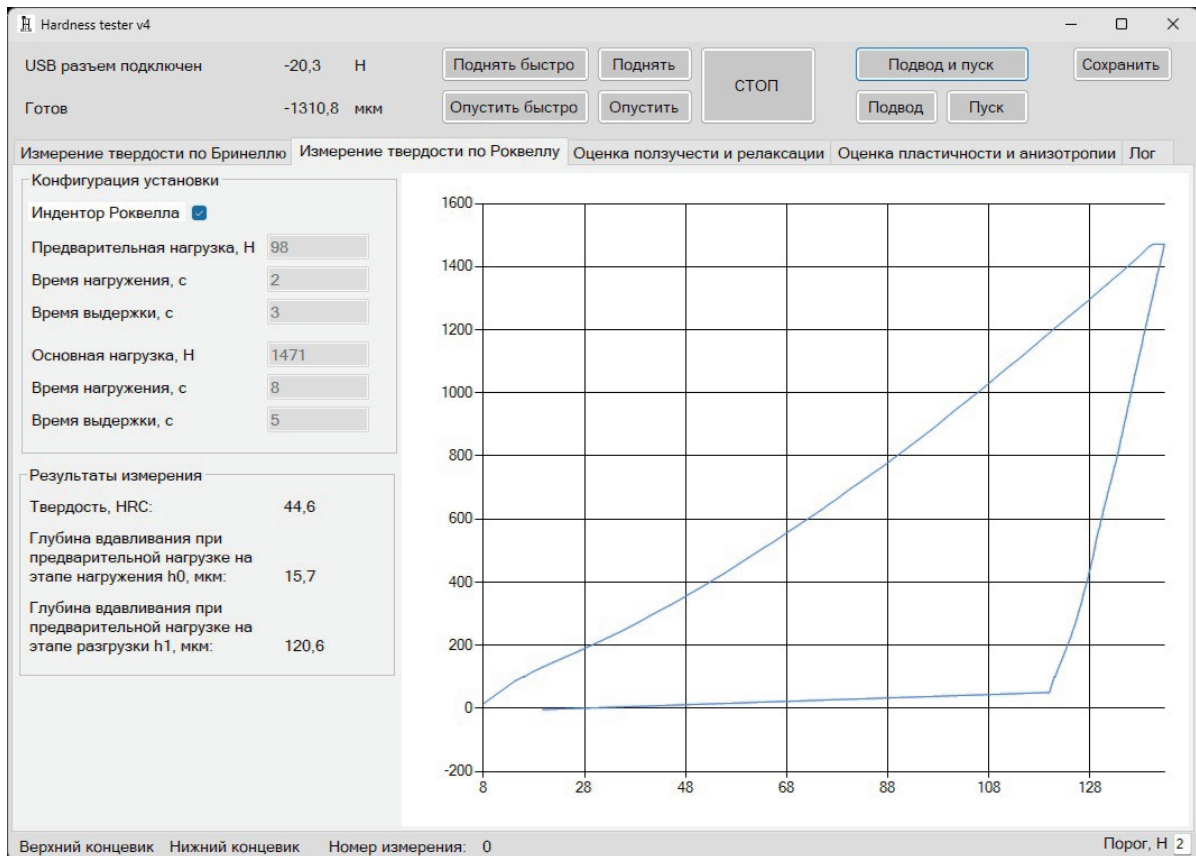


Рисунок 3 – Отображение результата измерения твердости по Роквеллу

Figure 3 – Display of Rockwell hardness measurement results

Выбор нагрузки и диаметра шарика осуществляют исходя из предполагаемой твёрдости и типа материала: для сталей соотношение $F/D^2 = 30$, для чугунов и медных сплавов – 10, для лёгких сплавов – 2,5...5. Выдержку под нагрузкой для металлов составляют 10–15 с, для полимеров – до 180 с.

Число твёрдости по Бринеллю HB рассчитывают по измеренному диаметру остаточного отпечатка d :

$$HB = \frac{0.102 \cdot 2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}, \quad (1)$$

где F – испытательная нагрузка, Н; D – диаметр шарика-индентора, мм; d – диаметр отпечатка, мм.

При использовании метода инструментального индентирования с непрерывной регистрацией диаграммы «нагрузка–глубина внедрения» допускается расчёт твёрдости по максимальной глубине внедрения $h_{\max}$:

$$HB = \frac{0.102F}{\pi D h_{\max}}. \quad (2)$$

Твёрдость по Роквеллу по шкале HRC определяют вдавливанием алмазного конуса с углом при вершине 120° . Испытание проводят в два этапа в соответствии с СТБ ISO 6508-1. Сначала прикладывают предварительную нагрузку $F_0 = 98$ Н, после чего фиксируют начальную глубину внедрения h_0 . Затем прикладывают дополнительную нагрузку до общей $F = 1471$ Н, выдерживают 5 с и снимают дополнительную нагрузку. После снятия основной нагрузки при сохранённой предварительной нагрузке измеряют остаточную глубину внедрения h_1 .

Твёрдость HRC вычисляют по формуле:

$$HRC = 100 - \frac{h_1 - h_0}{0.002}, \quad (3)$$

где h_0 и h_1 – глубина внедрения при предварительной нагрузке на этапах нагружения и разгрузки соответственно, мм; 0,002 – цена деления шкалы, соответствующая единице твёрдости, мм.

2. Метод определения модуля упругости. Определение статического модуля упругости

E_{ITS} проводят по диаграмме инструментального индентирования, анализируя начальный участок кривой разгрузки. Контактную жёсткость S определяют как наклон касательной к кривой разгрузки в точке максимальной нагрузки [12]:

$$S = 0,75 \frac{F_{\max}}{h_{\max} - h_c}, \quad (4)$$

где $F_{\max}$ – максимальная нагрузка, Н; $h_{\max}$ – максимальная глубина внедрения, м; h_c – контактная глубина внедрения, которую при инженерных расчётах допускается принимать как $h_c = (h_{\max} + h_p)/2$, где h_p – остаточная глубина отпечатка, м.

Для сферического индентора диаметром D площадь проекции контакта A_c рассчитывают через контактный диаметр d_c :

$$d_c = 2\sqrt{Dh_c - h_c^2}, \quad A_c = \pi \frac{d_c^2}{4}. \quad (5)$$

Приведённый (эффективный) модуль упругости системы «индентор–образец» E_{rs} находят по формуле:

$$E_{rs} = \frac{S\sqrt{\pi}}{2\sqrt{A_c}}. \quad (6)$$

Истинный модуль упругости исследуемого материала E_{ITS} вычисляют с учётом упругих свойств индентора:

$$E_{ITS} = \frac{(1 - \mu_m^2)}{\frac{1}{E_{rs}} - \frac{1 - \mu_i^2}{E_i}}, \quad (7)$$

где μ_m и μ_i – коэффициенты Пуассона материала и индентора (для стали $\mu_m = 0,28$, для карбида вольфрама $\mu_i = 0,21$); E_i – модуль упругости материала индентора (для карбида вольфрама $E_i = 630$ ГПа).

Результаты определения модуля упругости приведены на рисунке 2.

3. *Метод определения ползучести.* Исследование ползучести C_{ITS} проводят в режиме управления по нагрузке. Индентор вдавливают в образец до достижения заданной испытательной нагрузки, после чего поддерживают эту нагрузку постоянной в течение времени выдержки. В процессе выдержки регистрируют увеличение глубины внедрения [5, 6].

Ползучесть вычисляют как относительное приращение глубины внедрения за время выдержки:

$$C_{ITS} = \frac{h_2 - h_1}{h_1} \cdot 100\%, \quad (8)$$

где h_1 – глубина внедрения в момент достижения постоянной нагрузки, мм; h_2 – глубина внедрения в конце выдержки, мм.

Результаты определения ползучести приведены на рисунке 4.

Метод наиболее информативен для полимерных материалов, у которых ползучесть проявляется при комнатной температуре [6].

4. *Метод определения релаксации.* Определение релаксации R_{ITS} проводят в режиме управления по глубине. Индентор внедряют в образец до достижения заданной глубины, после чего поддерживают эту глубину постоянной в течение времени выдержки. Регистрируют снижение усилия на инденторе во времени.

Релаксацию вычисляют как относительное уменьшение усилия за время выдержки:

$$R_{ITS} = \frac{F_1 - F_2}{F_1} \cdot 100\%, \quad (9)$$

где F_1 – усилие в начале выдержки (при достижении заданной глубины), Н; F_2 – усилие в конце выдержки, Н.

Результаты определения релаксации приведены на рисунке 5.

Метод позволяет оценивать вязкоупругие свойства материалов, в том числе полимеров и композитов.

5. *Метод определения пластичности.* Пластичность материала оценивают двумя способами. Энергетический метод основан на анализе работы деформирования по полной диаграмме нагружения-разгрузки. Полную работу W_t , упругую работу W_e и пластическую работу W_p определяют интегрированием соответствующих участков диаграммы. Пластичность δ_w рассчитывают, как долю пластической работы [2, 5, 10]:

$$\delta_w = \frac{W_p}{W_t} = 1 - \frac{W_e}{W_t}. \quad (10)$$

Альтернативный метод основан на индентировании пирамидой Виккерса. Измерив твёрдость HV и зная модуль упругости E и коэффициент Пуассона ν материала, пластичность δ_H вычисляют по формуле:

$$\delta_H = 1 - 14,3(1 - \nu - 2\nu^2) \frac{9,81HV}{E}, \quad (11)$$

где HV – твёрдость по Виккерсу, МПа; E – модуль упругости, МПа; ν – коэффициент Пуассона.

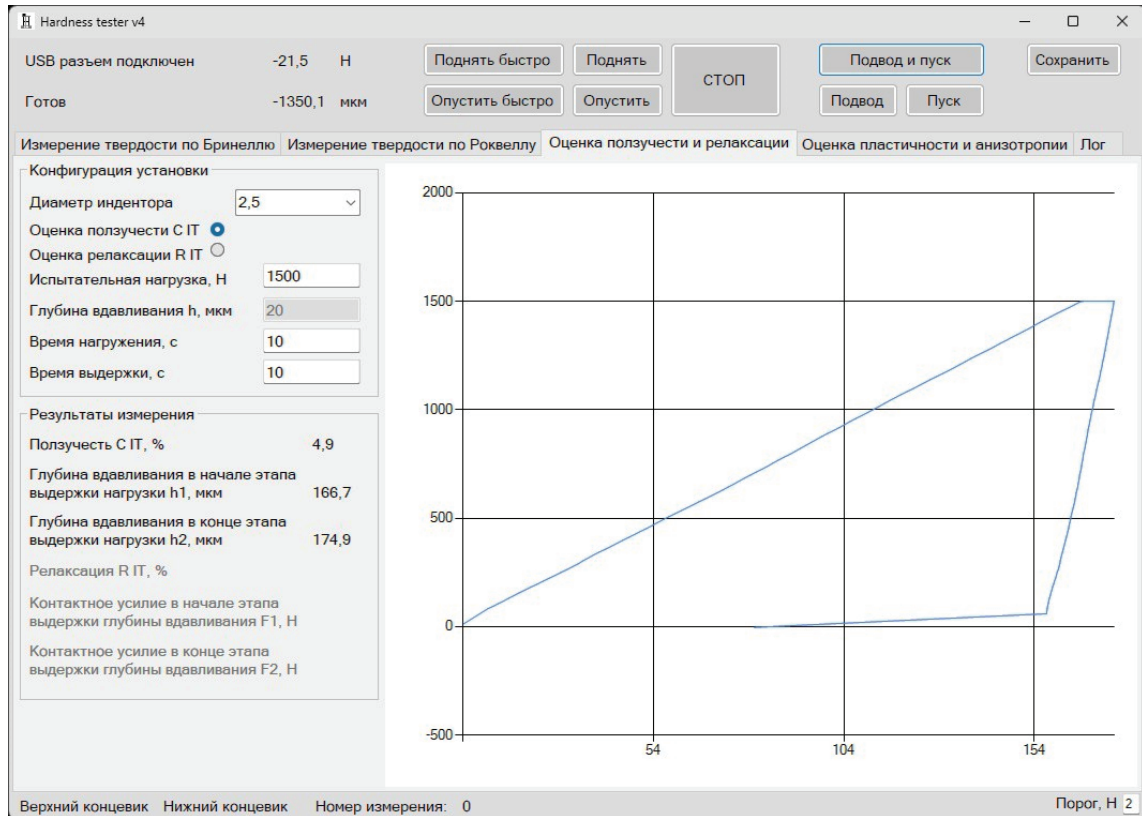


Рисунок 4 – Отображение результатов определения ползучести C_{ITS}

Figure 4 – Display of creep C_{ITS} determination results

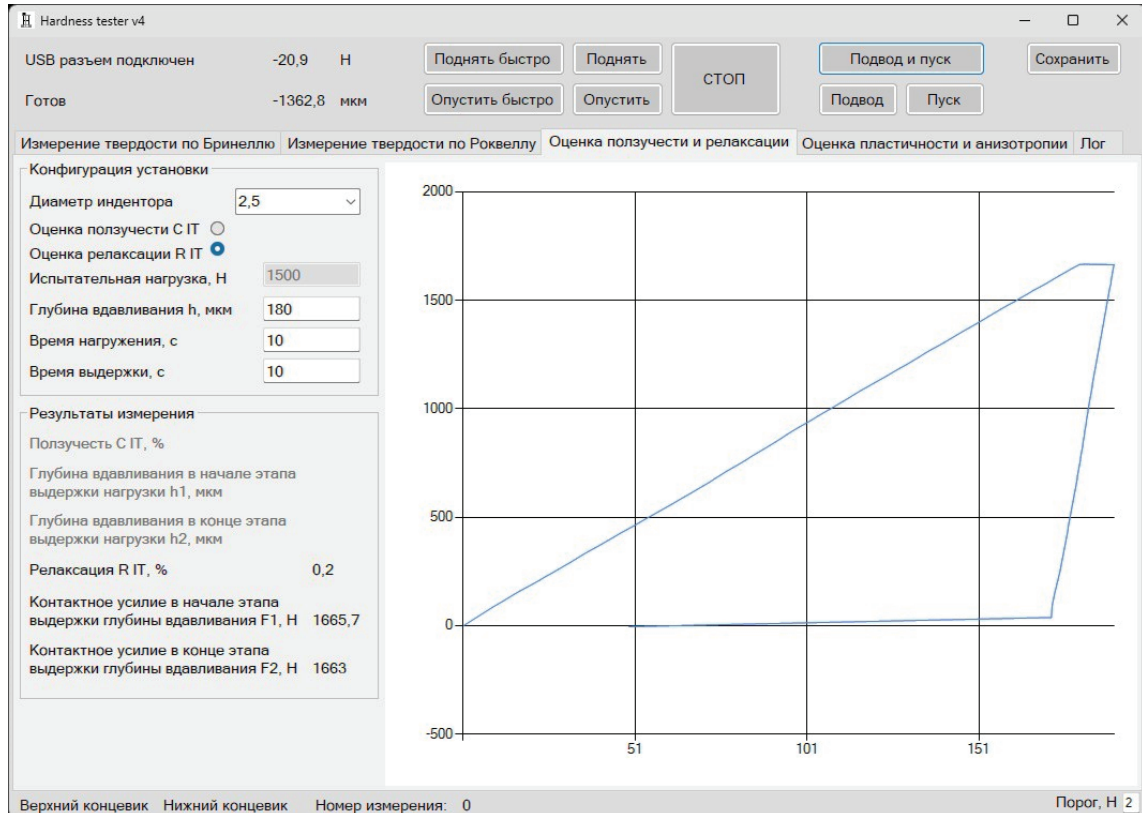


Рисунок 5 – Отображение результатов определения релаксации R_{IT}

Figure 5 – Display of relaxation R_{IT} determination results

Результаты определения пластичности приведены на рисунке 6.

6. *Метод определения коэффициента анизотропии.* Оценку анизотропии механических свойств проводят тремя способами в зависимости от типа материала и поставленной задачи [7, 8].

По разнице твёрдости в разных направлениях – выполняют серию вдавливаний в раз-

личных ориентациях образца (например, вдоль и поперёк направления прокатки или армирования). Коэффициент анизотропии a вычисляют как отношение максимальной твёрдости к минимальной. При использовании индентора Виккерса или сферического индентора Бринелля:

$$a = \frac{HV_{\max}}{HV_{\min}}; \quad a = \frac{HB_{\max}}{HB_{\min}}. \quad (12)$$

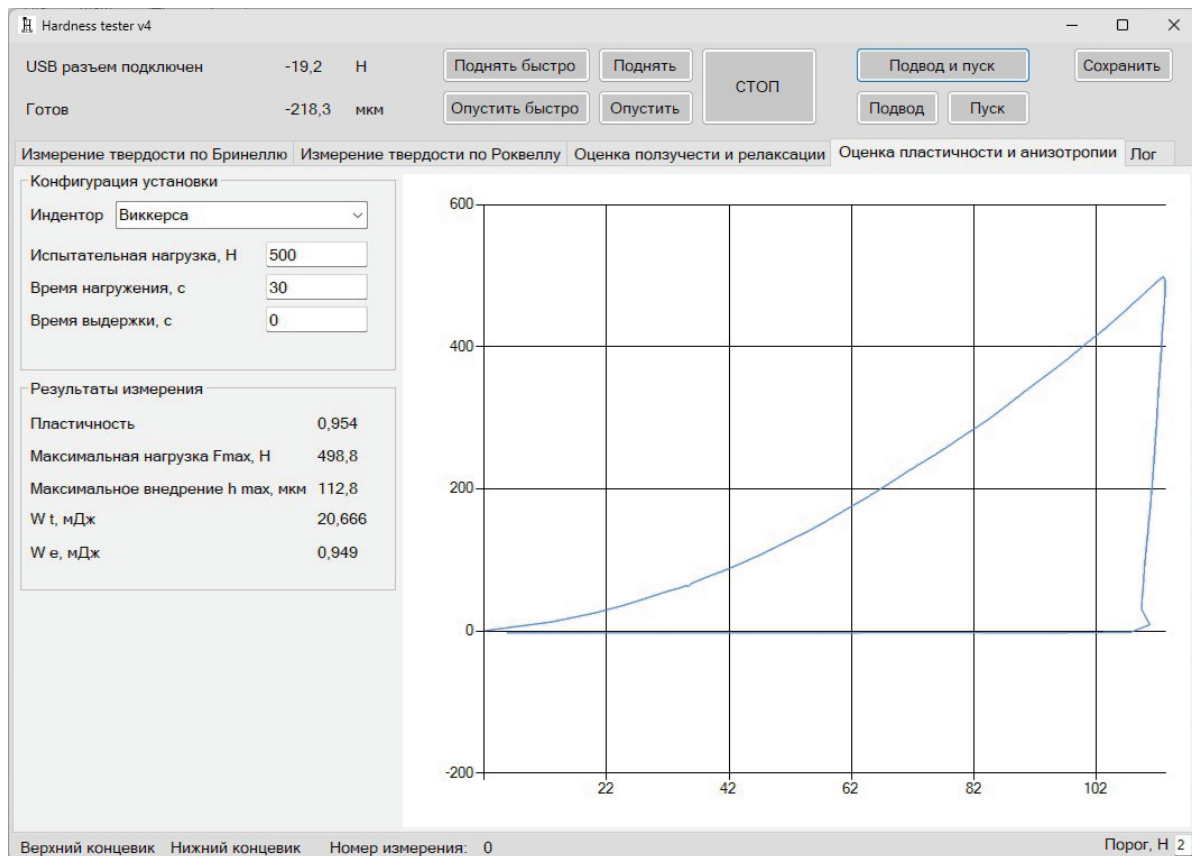


Рисунок 6 – Отображение результатов определения пластичности

Figure 6 – Display of plasticity determination results

По асимметрии отпечатка – для одного отпечатка измеряют два взаимно перпендикулярных размера (диаметры для сферического индентора или диагонали для пирамиды Виккерса):

$$a_d = \frac{\max(d_1, d_2)}{\min(d_1, d_2)}. \quad (13)$$

С использованием клиновидного индентора – проводят два измерения при одинаковой нагрузке: при ориентации клина вдоль направления анизотропии и поперёк. Коэффициент анизотропии определяют как отношение глубин внедрения [3]:

$$a_h = \frac{h_{\max}}{h_{\max \perp}}, \quad (14)$$

где $h_{\max}$ – максимальная глубина внедрения вдоль армирующего волокна; $h_{\max \perp}$ – максимальная глубина внедрения поперек армирующего волокна.

Значение коэффициента a , близкое к единице, свидетельствует об изотропии материала; отклонение от единицы указывает на наличие анизотропии, причём чем больше значение, тем сильнее выражена анизотропия свойств [7, 8].

7. *Обработка результатов эксперимента.* Для каждой исследуемой характеристики проводят

не менее пяти измерений в различных точках образца. Расстояние между отпечатками, а также от отпечатка до края образца должно составлять не менее трёх диаметров отпечатка. Результаты представляют в виде среднего арифметического значения и среднеквадратического отклонения. Статистическую обработку результатов выполняют с доверительной вероятностью 0,95.

Заключение

Представлены функциональные возможности измерительного комплекса УИМ-1, разработанного для комплексного исследования механических свойств материалов методом инструментального индентирования. Показано, что метод, основанный на непрерывной регистрации диаграммы «нагрузка–глубина внедрения», в отличие от традиционных разрушающих методов, позволяет в рамках одного испытания получать количественную информацию о широком спектре физико-механических характеристик – от твёрдости и модуля упругости до параметров ползучести, релаксации, пластичности и анизотропии, что подтверждает его универсальность и информативность.

Техническая реализация комплекса УИМ-1, включающая прецизионное электромеханическое нагружающее устройство с диапазоном нагрузок до 2000 Н, тензометрический датчик силы и фотоэлектрический датчик перемещения с разрешением 0,1 мкм, обеспечивает необходимую точность и воспроизводимость измерений в соответствии с требованиями международных и национальных стандартов (ISO 14577-1, СТБ 2495-2017). Модульная конструкция и оснащение сменными инденторами (сферическими диаметром 1–10 мм, алмазным конусом Роквелла, пирамидой Виккерса и кли-новидным индентором) расширяют область применения комплекса для исследования различных типов материалов – от металлов до полимеров и композитов.

Разработанные и реализованные в специализированном программном обеспечении измерительные методики базируются на единой экспериментальной базе, что позволяет определять твёрдость по шкалам Бринелля и Роквелла, модуль упругости, а также с использованием корреляционных зависимостей (ГОСТ 22761-77, ГОСТ 22762-77) оценивать предел прочности

и предел текучести. Дополнительные режимы измерений обеспечивают количественную оценку ползучести, релаксации, пластичности и коэффициента анизотропии, что особенно важно для изучения вязкоупругих свойств полимеров и направленных свойств армированных композитов.

Таким образом, измерительный комплекс УИМ-1 представляет собой эффективный и универсальный инструмент для лабораторного и научно-исследовательского применения, позволяющий с высокой достоверностью и информативностью оценивать упруго-пластическое поведение конструкционных материалов в условиях, приближенных к реальной эксплуатации. Дальнейшее развитие комплекса может быть связано с расширением температурного диапазона испытаний, внедрением методов высокоскоростного индентирования и разработкой дополнительных корреляционных моделей для более широкого класса материалов.

Список использованных источников / References

1. Tai J.L. [et al.]. Recent trends in non-destructive testing approaches for composite materials: A review of successful implementations. *Materials*. 2025;18(13):3146. DOI: 10.3390/ma18133146
2. Pazini MVL, Farias MCM, Suarez OAG. Avaliação de métodos para estimativas de propriedades mecânicas de materiais por indentação instrumentada: uma revisão. *Matéria (Rio de Janeiro)*. 2021;26(02):C.e12955. DOI: 10.1590/S1517-707620210002.1255
3. Крень А.П. Применение метода дифракции рентгеновских лучей для изучения напряжённого состояния поверхности металла при статическом и ударном деформировании / А.П. Крень // Приборы и методы измерений. – 2023. – Т. 14. – № 2. – С. 115-125. DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-2-115-125
3. Kren AP. [et al.]. X-ray Diffraction Method in the Study of a Metal Surface Stress State Under Static and Impact Deformation. *Devices and Methods of Measurements*. 2023;14(2):115-125. (In Russ.). DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-2-115-125
4. Крень А.П. Контроль механических характеристик чугуна методом микроударного индентирования / А.П. Крень // Приборы и методы измерений. – 2025. – Т. 16. – № 3. – С. 222-234. DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-3-222-234

4. Kren AP, Lantsman GA, Nikiforov AV, Tur-sunov 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

5. Li JCM. Impression creep and other localized tests. *Materials Science and Engineering: A*. 2002;322(1-2):23-42. **DOI:** 10.1016/S0921-5093(01)01116-9

6. Baral P. [et al.]. Indentation creep vs. indentation relaxation: A matter of strain rate definition? *Materials Science and Engineering: A*. 2020;781:139246.

DOI: 10.1016/j.msea.2020.139246

7. Vlassak JJ, Nix WD. Measuring the elastic properties of anisotropic materials by means of indentation experiments. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 1994;42(8):1223-1245.

DOI: 10.1016/0022-5096(94)90033-7

8. Goto K. [et al.]. Numerical calculation and finite element analysis for anisotropic elastic properties of carbon fibers: Dependence of integration subinterval and mesh size on indentation-derived elastic modulus. *SN Applied Sciences*. 2022;4(11):291 p.

DOI: 10.1007/s42452-022-05183-w

9. Flewitt PEJ, Wild RK. *Physical methods for materials characterisation*. CRC Press, 2017.

10. Fischer-Cripps AC. *Contact mechanics. Nanoin-dentation*. New York, NY: Springer New York, 2011:1-1.

11. Oliver WC, Pharr GM. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments. *Journal of materials research*. 1992;7(6):1564-1583.

12. Oliver WC, Pharr GM. Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: Advances in understanding and refinements to methodology. *Journal of Materials Research*. 2004;19(1):3-20.