

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ

Обзорная статья

УДК 006.86:620.178.746.22

<https://doi.org/10.20915/2077-1177-2026-22-1-47-63>



Испытания металлов на ударную вязкость по методу Шарпи: проблемы и пути обеспечения прослеживаемости измерений*

Е. Е. Гладышев  

ФБУ «Государственный региональный центр стандартизации, метрологии и испытаний в Нижегородской области», г. Нижний Новгород, Россия

 gladyshev@nnccsm.ru

Аннотация: Испытания металлов на ударную вязкость по методу Шарпи наряду со статическими испытаниями на растяжение составляют основу оценки их конструкционной прочности и надежности в самых разных отраслях промышленности. В настоящее время прослеживаемость измерений, проводимых при испытаниях на ударную вязкость с применением маятниковых копров, обеспечивается в основном результатами их поверки. Действующие методики поверки не учитывают критическую значимость одной из основных подсистем копра – подсистему нанесения удара и разрушения образца. В результате копёр, признанный по результатам поверки годным, в действительности показывает завышенные результаты измерений поглощенной энергии из-за ее паразитных потерь. Анализ российских и международных стандартов по испытаниям на ударную вязкость, публикаций отечественных и зарубежных авторов позволил выявить факторы, приводящие к завышенному результату измерения поглощенной энергии классическими копрами. Проведенные межлабораторные сличительные испытания, с одной стороны, это подтвердили, а с другой – обосновали нецелесообразность построения прослеживаемости измерений на основе классического метода испытаний на ударную вязкость.

Предложено в качестве основы обеспечения прослеживаемости измерений к действующему Государственному первичному эталону единицы силы ГЭТ 32–2011 применение эталонного маятникового копра наивысшей точности, поддерживающего инструментированный метод испытаний. Наличие в его составе измерительного преобразователя силы позволило рассматривать его в качестве рабочего эталона для дальнейшей передачи единицы силы эталонным мерам (образцам). А от них – инструментированным и классическим копрам соответственно. Предложено также включение эталонного копра непосредственно в состав совершенствуемых Государственного первичного эталона единицы силы ГЭТ 32–2011 или Государственного первичного эталона единицы ударного ускорения ГЭТ 57–84.

Для устранения проблемы, связанной с завышенными результатами измерения поглощенной энергии, необходима разработка и утверждение типа мер и стандартных образцов силы и поглощенной энергии. А для массового внедрения рассмотренного подхода, кроме государственной поверочной схемы, необходимы разработка единой методики поверки и ее распространение на все маятниковые копры, эксплуатируемые в России.

* Публикация подготовлена на основе доклада, представленного на Международной научно-технической конференции «Механометрика 2025. Механические измерения и испытания», которая прошла 1–3 июля 2025 года во Всероссийском научно-исследовательском институте метрологии имени Д. И. Менделеева. Статья была принята к публикации после доработки рукописи и прохождения процедуры рецензирования.

Описанные выше меры позволят в действительности обеспечить единство измерений при испытаниях на ударную вязкость, проводимых с применением как классических, так и инструментированных копров.

Ключевые слова: испытания металлов, ударная вязкость, испытания на ударную вязкость, метод Шарпи, метрологическая прослеживаемость измерений, инструментированные испытания

Для цитирования: Гладышев Е. Е. Испытания металлов на ударную вязкость по методу Шарпи: проблемы и пути обеспечения прослеживаемости измерений // Эталоны. Стандартные образцы. 2026. Т. 22, № 1. С. 47–63. <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2026-22-1-47-63>

Статья поступила в редакцию 29.10.2025; одобрена после рецензирования 19.03.2026; принята к публикации 25.03.2026.

MODERN METHODS OF ANALYSIS OF SUBSTANCES AND MATERIALS

Review Article

Charpy Impact Testing of Metals: Problems and Mechanisms of Ensuring Measurement Traceability

Evgeny E. Gladyshev  

Center for Standardization and Metrology of Rosstandart for Nizhniy Novgorod Region,
Nizhny Novgorod, Russia
 gladyshev@nncsm.ru

Abstract: Charpy impact testing of metals, along with static tensile testing, forms the basis for assessing their structural strength and reliability across various industries. Currently, the traceability of measurements performed during impact strength testing using pendulum impact testers is ensured mainly by the results of their verification. Existing verification procedures do not take into account the critical significance of one of the main subsystems of the impact tester – the impact and specimen fracture subsystem. As a result, an impact tester deemed suitable based on verification results actually shows overestimated absorbed energy measurement results due to parasitic energy losses.

An analysis of Russian and international standards on impact strength testing, as well as publications by domestic and foreign authors, has made it possible to identify factors leading to overestimated absorbed energy measurement results obtained with classical pendulum impact testers. The conducted interlaboratory comparison tests, on the one hand, confirmed this finding and, on the other hand, substantiated the impracticality of establishing measurement traceability based on the classical impact testing method.

It is proposed to use a reference pendulum impact machine of the highest accuracy, supporting the instrumented test method, as the basis for ensuring measurement traceability to the existing State Primary Standard of the unit of force GET 32–2011. The presence of a force measuring transducer in its composition allows it to be considered a working standard for further transferring the unit of force to reference measures (specimens), and from them, respectively, to instrumented and classical impact testers. It is also proposed to include the reference impact tester directly into the composition of the improved State Primary Standard of the unit of force GET 32–2011 or the State Primary Standard of the unit of impact acceleration GET 57–84.

To eliminate the problem associated with overestimated absorbed energy measurement results, it is necessary to develop and approve the type of force and absorbed energy measures and reference materials. Furthermore, for the widespread implementation of the considered approach, in addition to the State Verification Schedule, it is necessary to develop a unified verification procedure and extend it to all pendulum impact testers operated in Russia.

The measures described above will actually ensure the uniformity of measurements in impact strength testing performed using both classical and instrumented impact testers.

Keywords: mechanical testing of metals, impact toughness, impact toughness tests, Charpy impact test, metrological traceability, instrumented impact testing

For citation: Gladyshev EE. Charpy Impact Testing of metals: problems and mechanisms of ensuring measurement traceability. *Measurement Standards. Reference Materials*. 2026;22(1):47–63. (In Russ.). <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2026-22-1-47-63>

The article was submitted 29.10.2025; approved after reviewing 19.03.2026; accepted for publication 25.03.2026.

Введение

Ударная вязкость является важной физико-механической характеристикой материалов. Она определяет способность материалов поглощать энергию при динамическом нагружении и сопротивляться ударному разрушению. Испытания на ударную вязкость наряду со статическими испытаниями на растяжение по ГОСТ 1497–2023¹ составляют основу оценки конструкционной прочности и надежности материалов. Усложнение условий эксплуатации и ужесточение требований к безопасности и надежности устройств и механизмов в современном мире повышают значимость оценки сопротивления материалов ударным нагрузкам [1, 2].

Метод применяется чрезвычайно широко, начиная с научных исследований и до входного контроля металлопроката на производственных предприятиях. Ежегодно в России проходит поверку более 1 500 маятниковых копров².

¹ ГОСТ 1497–2023 Металлы. Методы испытаний на растяжение.

² Востребованность метрологических услуг на поверку маятниковых копров оценили по данным модуля «Поверка» подсистемы «Аршин» Федерального информационного фонда по обеспечению единства измерений (ФГИС «Аршин» ФИФ ОЕИ). В обзор включили сведения о поверке средств измерений «копры» и «копры маятниковые» за период 2024–25 гг.

https://fgis.gost.ru/fundmetrology/cm/results?filter_mititle=копры&rows=100&activeYear=2025

https://fgis.gost.ru/fundmetrology/cm/results?filter_mititle=копры&rows=100&activeYear=2024

(дата обращения: 23.02.2026).

Такие данные показывают, что оценка сопротивления ударному разрушению – не единичное действие, а массовая, строго регламентированная практика, охватывающая тысячи лабораторий и производственных предприятий по всей стране.

Экономический эффект проведения подобных испытаний весьма существен. В частности, он достигается путем предотвращения катастроф: своевременное выявление склонности материала к хрупкому разрушению позволяет избежать аварий и инцидентов, связанных с внезапным разрушением критических конструкций (осей, валов, элементов каркасов, сосудов высокого давления).

Риски, связанные с игнорированием этого параметра, крайне высоки. Материал с отличными характеристиками при статическом нагружении может проявить хрупкость и разрушиться внезапно под действием динамической нагрузки, удара или вибрации. Особую опасность это представляет при низких температурах, когда возникает низкотемпературная хрупкость («хладноломкость») стали [3].

Испытания на ударную вязкость позволяют точно классифицировать материалы по их стойкости к динамическим нагрузкам и дают возможность не переплачивать за избыточно прочные и дорогие сплавы там, где этого не требуется, и, наоборот, применять более надежные материалы в ответственных узлах.

Метрологическое обеспечение испытаний на ударную вязкость в основном заключается

в поверке маятниковых копров. Однако существующая в России практика поверки маятниковых копров сосредоточена в подавляющем большинстве случаев на поверке измерительных подсистем копров (подсистемы воспроизведения и измерения ударного воздействия), игнорируя при этом критически значимую подсистему нанесения удара и разрушения образца. Методики поверки, установленные при утверждении типа средства измерений, зачастую предусматривают проверку исключительно измерительных подсистем, порой даже только частичную. Данный методологический подход приводит к систематическому завышению результатов испытаний вследствие не учета паразитных потерь энергии в подсистеме нанесения удара и разрушения образца. Это обстоятельство, отмеченное также в [4], ставит под сомнение валидность и надежность результатов испытаний, что, в свою очередь, может приводить к ошибкам в оценке качества и эксплуатационных характеристик продукции.

Важно отметить, что на данный момент нет прямой метрологической прослеживаемости результатов измерений поглощенной энергии при испытаниях по методу Шарпи к государственным первичным эталонам единиц величин. Это создает риск низкой достоверности и рассогласованности данных между лабораториями, так как отсутствие прослеживаемости не позволяет обеспечить необходимую точность и сопоставимость результатов.

Цель описанного в статье исследования – определение способов (путей) обеспечения прослеживаемости измерений величин, описывающих испытания металлов по методу Шарпи на основе существующих и/или совершенствуемых государственных первичных эталонов. Такой подход к цели исследования обусловлен необходимостью скорейшего внедрения современных методов испытаний на ударную вязкость в связи с их особой значимостью для определения физико-механических свойств металлов, а также необходимостью встраивания их результатов в систему обеспечения единства измерений.

Для достижения цели исследования необходимо решить следующие задачи:

- провести анализ отечественных и международных документов по испытаниям на ударную вязкость;

- рассмотреть оборудование, применяемое для испытаний на ударную вязкость, – копры маятниковые как совокупность подсистем воспроизведения удара, измерения его показателей, нанесения самого удара и разрушения образца;

- выделить и оценить факторы в подсистеме нанесения удара и разрушения образца копра, влияющие на точность результатов измерений при проведении испытаний по методу Шарпи, на основе публикаций отечественных и зарубежных авторов; проанализировать возможности и целесообразность их учета в исправленном результате измерений в виду сложности контроля классическими средствами измерений в условиях эксплуатации;

- провести анализ межлабораторных сравнительных испытаний в Нижегородской области для подтверждения нецелесообразности построения прослеживаемости измерений при испытаниях по методу Шарпи на основе классических методов;

- провести анализ инструментированных испытаний (испытаний с установленным совместно с бойком измерительным преобразователем силы) на предмет возможного обеспечения прослеживаемости к первичному эталону единицы силы; описать алгоритм преобразования исходной зависимости силы от времени в зависимость силы от перемещения бойка с последующим расчетом поглощенной энергии;

- построить схему обеспечения прослеживаемости измерений при испытаниях по методу Шарпи к ГЭТ 32–2011³ через рабочие эталоны единицы силы на основе эталонных машин (копров) для испытаний металлов на двухопорный изгиб по ISO 148-3:2016⁴ и соответствующей инфраструктуры для обеспечения прослеживаемости, включая силовоспроизводящие машины для статической и динамической калибровки измерительного преобразователя силы из состава эталонного копра; разработать соответствующую двухуровневую схему.

³ ГЭТ 32–2011 Государственный первичный эталон единицы силы.

⁴ ISO 148-3:2016 Metallic materials – pendulum impact test – Part 3: Preparation and characterization of Charpy V-notch test pieces for indirect verification of pendulum impact machines.

Материалы и методы

Аналитический метод

Аналитический метод применен для изучения стандартов и научных публикаций отечественных и зарубежных авторов по вопросам метрологического обеспечения испытаний металлов на ударную вязкость. Преимущественное использование аналитического метода в настоящем исследовании обусловлено отсутствием в отечественной практике оценки метрологических характеристик маятниковых копров с применением стандартных образцов и применения инструментированного метода испытаний. Поэтому для построения прослеживаемости измерений при испытаниях на ударную вязкость по методу Шарпи, включая государственные поверочные схемы, приходится опираться в основном на зарубежный опыт.

Для достижения цели исследования прежде всего был проведен анализ нормативных документов, регламентирующих метрологическое обеспечение испытаний металлов на ударную вязкость, с использованием профессиональной справочной системы «Техэксперт».

Объектом анализа стали ГОСТ 9454–78⁵, ГОСТ 9454–2025⁶ и ГОСТ Р ИСО 148-1–2013⁷.

Для проведения сравнительного анализа с международными стандартами и практическими подходами к испытаниям металлов на ударную вязкость были использованы ISO 148-1:2016 и ASTM E23-18⁸. Кроме того, в исследовании учитывались данные и многолетний опыт Национального института стандартов и технологий (NIST, США) в области метрологии испытаний по методу Шарпи.

Рассмотрение остальных нормативных документов и научных публикаций будет приведено в дальнейшем при обсуждении результатов исследования.

⁵ ГОСТ 9454–78 Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах.

⁶ ГОСТ 9454–2025 Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах. (Вступит в действие 1 мая 2026 г.)

⁷ ГОСТ Р ИСО 148-1–2013 Материалы металлические. Испытание на ударный изгиб на маятниковом копре по Шарпи. Часть 1. Метод испытания.

⁸ ASTM E23-18 Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials.

Эмпирический метод

Эмпирический метод был применен для анализа результатов специального раунда межлабораторных сличительных испытаний (МСИ) «Энергия удара», проведенного в начале 2025 г. Провайдер МСИ – ФБУ «Нижегородский ЦСМ». Участники МСИ – четыре лаборатории Нижегородской области. Объект измерений – образцы типа 11 (55 × 10 × 10 мм V-образный концентратор) по ГОСТ 9454–78, изготовленные из стали 20. Методика измерений описана в ГОСТ 9454–78. Для раунда была изготовлена однородная партия образцов со средней работой удара KV = 130 Дж. Каждому участнику МСИ был направлен комплект из пяти образцов. Определяемый показатель объекта измерений – работа удара (поглощенная энергия). Приписанные значения были получены с использованием эталонной машины (копра маятникового) модели PSW-750 (производитель ZwickRoell GmbH), специально изготовленная в соответствии с требованиями международного стандарта ISO 148-3:2016, с метрологическими характеристиками, подтвержденными с применением эталонных образцов согласно ISO 148-3:2016.

Результаты и обсуждение

Аналитический этап

Метод испытания на удар, основанный на маятниковом принципе, обычно называют методом Шарпи.

В настоящее время данные испытания в России регулируются стандартами ГОСТ 9454–78 и ГОСТ Р ИСО 148-1–2013, гармонизированным с международным стандартом ISO 148-1:2016. Результатом испытаний было заявлено измеренное значение работы (энергии), затраченной для разрушения образца на маятниковом копре.

Процедура и расчетная база

Испытание заключалось в разрушении образца с надрезом (концентратором) с помощью маятникового ударника и определения работы (энергии), затраченной на разрушение образца. Для проведения испытаний были изготовлены образцы в форме параллелепипеда с U- или V-образным концентратором. Размеры образцов и концентраторов

регламентированы документами ГОСТ 9454–78, ГОСТ Р ИСО 148-1–2013, ISO 148-1:2016, ASTM E23-18.

Поглощенная энергия (работа удара) $KV(KU)$ была рассчитана исходя из разницы запасов потенциальной энергии маятника до и после удара.

$$KV(KU) = m \cdot g \cdot (h_1 - h_2), \quad (1)$$

где $KV(KU)$ – работа удара для образцов с концентраторами видов V(U), Дж; m – масса маятника, кг; g – ускорение свободного падения в месте установки маятникового копра, м/с²; h_1 – начальная высота подъема маятника, м; h_2 – высота взлета маятника после соударения с образцом, м.

На маятниковых копрах не измеряют потенциальную энергию или высоту напрямую. Вместо этого используется механизм, который фиксирует угол сброса и угол подъема маятника после разрушения образца.

$$KV(KU) = m \cdot g \cdot l \cdot (\cos(\alpha_2) - \cos(\alpha_1)), \quad (2)$$

где l – длина маятника (расстояние от оси вращения до центра удара (центра тяжести маятника)), м; α_1 – угол подъема маятника (до удара), градус; α_2 – конечный угол взлета маятника (после удара), градус.

Так же, согласно ГОСТ 9454–78, за результат испытаний была принята ударная вязкость, равная отношению поглощенной энергии к площади сечения образца в месте удара.

$$KCV(KCU) = \frac{KV(KU)}{S_0}, \quad (3)$$

где $KCV(KCU)$ – ударная вязкость, определенная на образце с концентратором вида V (U), Дж/см²; S_0 – начальная площадь поперечного сечения образца в месте концентратора, см².

Копёр как совокупность подсистем

Для испытаний на ударный изгиб в Российской Федерации используют маятниковые копры по ГОСТ 10708–82⁹ с запасом потенциальной энергии, достаточной для разрушения образца одним ударом. Данный стандарт не определяет различные подсистемы маятниковых копров, устанавливая лишь общие технические и метрологические требования.

Однако с прикладной точки зрения и процесса испытания любой маятниковый копёр можно рассматривать как совокупность трех основных подсистем (рис. 1):

⁹ГОСТ 10708–82 Копры маятниковые. Технические условия.

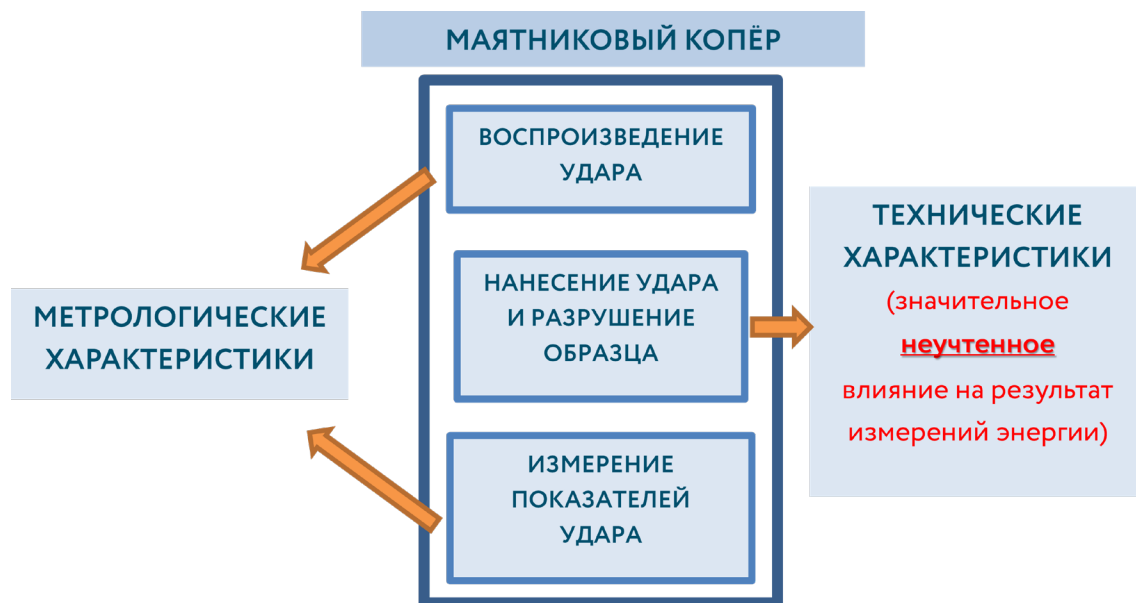


Рисунок подготовлен авторами / The figure is prepared by the authors

Рис. 1. Блок-схема маятникового копра

Fig. 1. Block diagram of the pendulum impact tester

1) подсистемы воспроизведения удара – маятника с системой подъема и фиксации;

2) подсистемы измерения показателей удара – шкалы или электронного блока (энкодера), измеряющего угол подъема маятника после удара;

3) подсистемы нанесения удара и разрушения образца – опоры и упоров для образца, бойка, механизма фиксации.

Подсистема воспроизведения удара и подсистема измерения показателей удара участвуют в измерении потенциальной энергии до и после удара и имеют нормированные метрологические характеристики, которые в большинстве случаев и контролируются при проведении поверки согласно утвержденным методикам. Проверяются вес маятника (реакция опоры маятника), расстояние от оси качания до центра удара, точность измерения углов подъема и взлета маятника, что обеспечивает прямую прослеживаемость измерений разности потенциальных энергий к национальным эталонам единиц массы, длины и плоского угла. Поскольку имеются зависимости (формула (2)), позволяющие определить потенциальную энергию маятника до и после удара расчетным путем, оценку показателей точности для подсистем воспроизведения и измерения удара можно рассчитать исходя из подходов, применяемых для косвенных измерений.

Подсистема нанесения удара и разрушения образца обеспечивает установку образца и его взаимодействие с маятником и станиной копра в процессе испытаний. Технические характеристики данной подсистемы оказывают значительное, причем – неучтенное, влияние на результат измерения энергии.

Ограничения в реализации подсистем копра

В Российской Федерации на данную особенность обратили внимание Г. П. Зайцев в работе 1938 г. [5] и С. Я. Бейль в работе 1948 г. [6]. Оба отметили влияние элементов подсистемы *нанесения удара и разрушения образца* на результаты испытаний на ударную вязкость. Других исследований по этой тематике в отечественной литературе автору данной статьи найти не удалось.

В [7] авторами дана оценка неопределенности при испытаниях на ударный изгиб

с использованием стандартного образца, которая не учитывала факторы, связанные с *подсистемой нанесения удара и разрушения образца*. Однако авторы также сделали вывод, что основным вкладом в неопределенность результата испытания является, в том числе, влияние факторов, которое невозможно оценить при непосредственной калибровке копра.

Существование и важную роль таких факторов отметили американские испытатели в 1955 г. [8] и развили в дальнейших работах [9]. Данные факторы способствуют получению ошибочных результатов испытаний: несоответствующих размеров, положения, состояния контактных поверхностей опор, упоров и бойка молота; потери энергии на трение и вибрации в движущихся частях; «неплотности» сопрягаемых частей; недостаточного зазора между торцами образца и боковыми опорами.

Рассмотрим подробнее роль каждого фактора.

Параллельность опор, перпендикулярность опорной поверхности оси образца, соосность бойка (ножа) относительно упоров, точность установки самого образца критически важны. Неправильное положение сломанных половинок образца из-за некорректной геометрии упоров или их износа приводит к их соударениям с маятником или станиной копра после основного удара. Эта кинетическая энергия ошибочно учитывается электронным блоком (энкодером) как часть поглощенной энергии. Такой эффект может добавлять к показаниям копра от 0,5 до 1 Дж, что особенно существенно для низкоэнергетических образцов.

Поверхности бойка (ножа), опор и упоров со временем изнашиваются, на них появляются вмятины, забоины, следы коррозии или шероховатость. Любые неровности на контактных поверхностях создают точки с повышенным давлением, что может вызывать преждевременное пластическое течение или растрескивание образца в зоне контакта, искажающие реальную картину разрушения. Изменение шероховатости поверхности опор влияет на трение между образцом и упорами, что незначительно, но, тем не менее, вносит вклад в общее значение энергии.

Потери энергии на трение и вибрации в маятниковом копре являются систематической

погрешностью, которая может быть отделена от энергии, затраченной непосредственно на разрушение образца. Учет таких потерь важен для получения точных и воспроизводимых результатов.

Потери на трение делятся на два основных типа:

1) *трение в подшипниках* – это сопротивление вращению маятника вокруг своей оси, вызванное трением между осью маятника и подшипниками. Энергия, затрачиваемая на преодоление силы трения, вычитается от общего запаса потенциальной энергии маятника. Если эту поправку не вносить, копёр будет измерять большую поглощенную энергию, чем на самом деле ушло на разрушение образца;

2) *аэродинамическое сопротивление* – это сопротивление воздуха, которое испытывает массивный маятник при движении. Как и трение в подшипниках, эта сила тормозит маятник, приводя к потере энергии, не связанной с образцом.

Описанные выше потери на трение могут быть учтены путем проведения «холостого сброса» – сброса маятника без установленного образца. Измеряется разность между начальным углом подъема и углом взлета после свободного качания. Эта разность, пересчитанная в энергию, представляет собой суммарные потери на трение в подшипниках и сопротивление воздуха. В дальнейшем это значение с учетом фактической высоты подъема маятника вычитается из результатов испытаний.

Потери на вибрацию являются более сложным и «тонким» типом потерь, который, в отличие от трения, не всегда полностью устраняется стандартной поправкой. Удар по образцу – это динамический процесс, вызывающий не только общее торможение маятника, но и возбуждение в нём упругих колебаний (вибраций). Такие колебания поглощают часть энергии удара. Электронный блок (энкодер) копра измеряет общую потерю запасенной потенциальной энергии маятника, которая включает и энергию, израсходованную на вибрацию маятника после соударения. Так результат испытания завышается на величину энергии, связанной с этой вибрацией.

Величина вибрационных потерь чрезвычайно зависит от двух факторов:

1) продолжительности импульса (т. е. от того, хрупкий или вязкий образец);

2) положения точки удара относительно центра перкуссии (точки на молоте копра, при ударе в которую не возникает ударной нагрузки или вибрации на оси вращения).

Для хрупких образцов (низкая энергия, короткий импульс ~ 200 мкс) быстрое разрушение вызывает высокочастотные возмущения. Как показано в [10], в данном случае в маятнике может оставаться от 0,5 до 1,5 Дж вибрационной энергии.

Для пластичных образцов (высокая энергия, длительный импульс > 3000 мкс) вибрационные потери также существуют, но они малы в процентном отношении к общей поглощенной энергии (сотые доли процента). Кроме того, большая часть этой вибрационной энергии передается обратно в образец через демпфирование пластичностью.

Если в подшипниках имеется *радиальный зазор (люфт)*, ударное воздействие вызывает не только трение, но и микроперемещение (люфты) оси в подшипнике. На совершение этой работы также тратится энергия. Такая потеря энергии не возникает при холостом разгоне, так как нет ударных вибраций, вызывающих люфт. Поэтому стандартная поправка на трение ее не учитывает. На основе моделирования, приведенного с учетом максимально допустимого ASTM E23-18 радиального зазора (0,075 мм) и ударных реакций в подшипниках [10], была оценена возможная величина этих потерь: от 0,12 до 0,6 Дж для длительных испытаний пластичных образцов.

«Неплотность» *сопрягаемых частей* – еще один фактор. В маятниковом копре имеются несколько узлов с сопрягаемыми частями: упоры – станина копра, боёк – молот, станина копра – фундамент. «Неплотность» создает микрозазор, который при ударе приводит к относительным перемещениям сопрягаемых частей. Энергия маятника тратится:

– на упругую и пластическую деформацию в зоне контакта сопрягаемых частей;

– на преодоление трения в этом соединении;

– на возбуждение высокочастотных колебаний бойка (ножа) относительно молота.

Неплотно закрепленные упоры (опоры) при ударе будут просаживаться или вибрировать,

поглощая часть энергии, которая также будет засчитана электронным блоком (энкодером) копра как энергия, потраченная на разрушение образца.

При *недостаточном зазоре* между торцами образца и боковыми упорами возникают два ключевых негативных эффекта, которые можно обнаружить при осмотре разрушенного образца:

1) дополнительное трение и искусственное завышение энергии;

2) искажение кинематики разрушения и сложное напряженное состояние.

При ударе образец испытывает поперечное укорочение и незначительное продольное смещение. Если боковой зазор мал, возникает сильное трение торцов образца о края опор. На боковых поверхностях образца (не на лицевой стороне, а с торцов) появляются дополнительные задиры, сглаживания или «размазанные» метки, параллельные основным следам от опор. Такие метки выходят за зону контакта с опорами и явно указывают на нежелательный контакт. Энергия, затраченная на преодоление этого трения, добавляется к поглощенной энергии разрушения. Это приводит к систематическому завышению показаний, особенно для пластичных (высокоэнергетических) образцов, которые подвергаются большей деформации.

Как показано в [11], неравномерное нагружение приводит к скошенным поверхностям излома и смещению следов контакта. Недостаточный зазор может быть одной из скрытых причин такого смещения. Напряжения в образце перераспределяются, что может (а) изменять механизм разрушения; (б) увеличивать разброс результатов, снижая воспроизводимость; (в) вызывать существенное искусственное завышение энергии из-за дополнительной работы по преодолению трения.

Оценка факторов, влияющих на результат испытаний

Резюмируем: все перечисленные факторы приводят к систематическому завышению результатов измерений поглощенной энергии. Причина в том, что часть энергии маятника тратится не на разрушение образца, а на преодоление указанных паразитных явлений. Измерительная система интерпретирует всю потерянную энергию как работу разрушения. Как следствие – некачественная продукция становится годной!

Количественная оценка максимального влияния данных факторов приведена на рис. 2. Как видно из диаграммы, общее значение потерь энергии может составлять 13 Дж и более.

Количественная оценка влияния факторов, способствующих получению ошибочных результатов, Дж



Рисунок подготовлен авторами / The figure is prepared by the authors

Рис. 2. Диаграмма количественной оценки максимального влияния факторов, способствующих получению ошибочных результатов

Fig. 2. Diagram for the quantitative assessment of the maximum influence of factors contributing to erroneous results

Отметим, что наибольшее значение могут иметь факторы «неплотность» сопрягаемых частей и недостаточный зазор между торцами образца и боковыми опорами, которые приводят к значительному искажению результатов измерений энергии разрушения образца.

Технические характеристики подсистемы нанесения удара и разрушения образца проблематично проконтролировать классическими средствами измерений в условиях эксплуатации. В некоторых случаях контроль практически невозможно провести на практике из-за особенностей конструкции маятниковых копров или из-за мер безопасности, реализованных производителем копра.

Анализ результатов МСИ в Нижегородской области

Ярко иллюстрируют описанную в статье проблему результаты раунда межлабораторных сличительных испытаний, проведенного ФБУ «Нижегородский ЦСМ» в начале 2025 г. среди четырех испытательных лабораторий Нижегородской области.

Объект измерений – образцы типа 11 ($55 \times 10 \times 10$ мм V-образный концентратор) по ГОСТ 9454–78, изготовленные из стали 20, заготовка которой предварительно подверглась

специальным режимам термообработки. Методика измерений описана в ГОСТ 9454–78. Каждому участнику МСИ был направлен комплект из пяти образцов. Определяемый показатель объекта измерений – работа удара (поглощенная энергия).

Приписанное значение работы удара партии образцов: $KV = 130$ Дж. Приписанное значение было получено с использованием эталонной машины (копра маятникового) модели PSW-750 (производитель ZwickRoell GmbH), специально изготовленной в соответствии с требованиями международного стандарта ISO 148-3:2016. Метрологические характеристики были подтверждены, в том числе, с применением эталонных образцов по ISO 148-3:2016 международной калибровочной лабораторией¹⁰.

Результаты представлены на рис. 3.

Как иллюстрирует рис. 3, все участники получили завышенные результаты, в некоторых случаях более 30 Дж, при этом:

- маятниковые копры участников имели действующие свидетельства о поверке;
- пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений энергии удара маятниковых

¹⁰ Сертификат калибровки ZwickRoell GmbH & Co. KG № 733331-2019-08 от 13.08.2019.

Статистика функционирования участников раунда

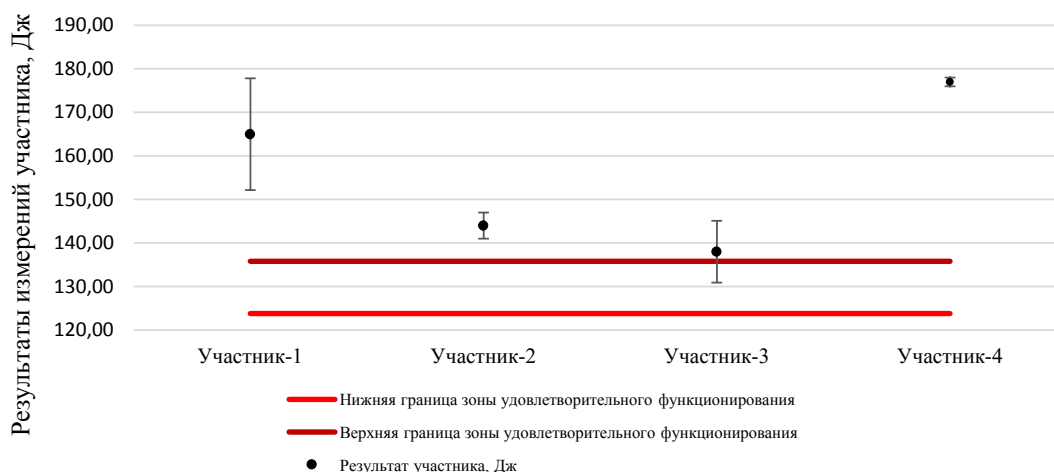


Рисунок подготовлен авторами / The figure is prepared by the authors

Рис. 3. Статистика функционирования участников раунда межлабораторных сличительных испытаний: $\pm 3,0$ Дж – пределы допускаемой абсолютной погрешности маятниковых копров согласно описанию типа
Fig. 3. Performance statistics of participants in the round of interlaboratory comparison tests: ± 3.0 J – permissible absolute error limits of pendulum impact testers according to the type description

копиров участников в соответствии с описаниями типа средства измерений равны $\pm 3,0$ Дж.

Вкупе эти обстоятельства подтверждают тезис о недостаточности традиционной поверки, контролирующей только первые две подсистемы копра. Результаты анализа результатов участника № 1 и оценка состояния его маятникового копра установили полное соответствие маятникового копра требованиям ГОСТ 10708–82. Причину большого отклонения и размаха значений увидели в несоответствующей затяжке резьбовых соединений упоров (опор) копра при правильном их расположении, т. е. во влиянии фактора «неплотность» сопрягаемых частей.

Данный эксперимент наглядно демонстрирует:

- 1) отсутствие действительной метрологической прослеживаемости результатов измерений ударной вязкости к национальным эталонам;
- 2) низкую степень их достоверности и согласованности между различными лабораториями.

Дополнительно отметим: проведение аналогичных раундов межлабораторных сравнительных испытаний, в которых приписанное значение определяется как общее среднее результатов всех участников, является не совсем корректным по причине наличия не исключенного смещения приписанного значения образцов в сторону больших значений энергии. Данное смещение обусловлено описанными выше особенностями подсистемы нанесения удара и разрушения образца.

Современный подход к оптимизации метода

В настоящее время все более широкое распространение получают так называемые инструментированные испытания, описанные в международных стандартах ISO 14556:2023¹¹ и ASTM E2298-24¹². В утвержденном в 2025 г. межгосударственном стандарте ГОСТ 9454–2025 также описаны инструментированные испытания, правда, факультативно. Отличие таких испытаний от обычного метода Шарпи заключается в применении

¹¹ ISO 14556:2023 Metallic materials – Charpy V-notch pendulum impact test – Instrumented test method.

¹² ASTM E2298–24 Standard Test Method for Instrumented Impact Testing of Metallic Materials.

специальных преобразователей силы, встроенных в боёк (нож) маятников копров. Результат данных испытаний представлен диаграммой нагрузки-перемещения (рис. 4).

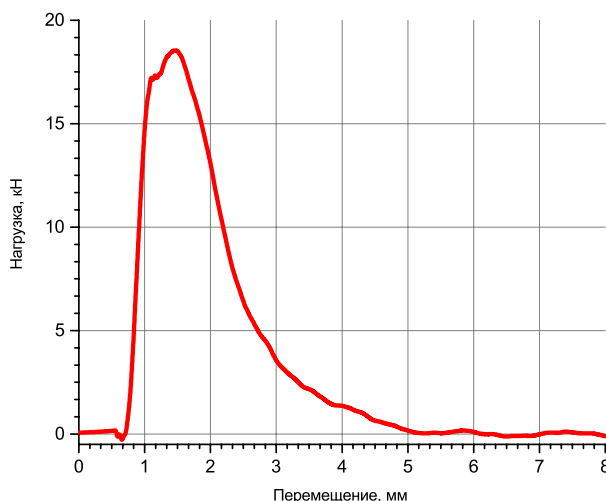


Рисунок подготовлен авторами / The figure is prepared by the authors

Рис. 4. Пример диаграммы нагрузка-перемещение: тип III по ГОСТ 9454–2025 (стабильное развитие трещины и вязкое разрушение)

Fig. 4. Example of a load-displacement diagram: type III according to GOST 9454–2025 (stable crack growth and ductile fracture)

Энергия, затраченная на разрушение образца, рассчитывается как площадь под данной кривой. При этом регистрируется не косвенная разность высот маятника, а непосредственно силовой сигнал во времени в процессе удара и разрушения образца. Переход зависимости силы удара от времени $F(t)$ к зависимости силы от перемещения бойка $F(s)$ осуществляется согласно формулам (4)–(7).

$$F(t) = -m \cdot a(t), \quad (4)$$

где m – принятая масса маятника, кг; $a(t)$ – модуль ускорения, с которым маятник замедляется во время удара, м/с.

$$V(t) - V(t_0) = -\frac{1}{m} \int_{t_0}^t F(t) dt, \quad (5)$$

где t_0 – время в момент удара, с; t – исследуемый момент времени после удара, с; $V(t)$ – скорость маятника в исследуемый момент времени после удара, м/с; $V(t_0) \equiv V_0 = \sqrt{2 \cdot g \cdot h}$ – скорость маятника в момент удара, м/с; g – ускорение

свободного падения в месте установки маятникового копра, m/c^2 ; h – высота подъема маятника перед проведением испытания, м.

$$s(t) = \int_{t_0}^t V(t)dt = V(t_0) \cdot t - \frac{1}{m} \int_{t_0}^t F(t)dt, \quad (6)$$

где $s(t)$ – перемещение бойка в момент времени t , м.

Совмещение измеренной зависимости $F(t)$ и полученной по результатам ее обработки зависимости $s(t)$ приводит к получению зависимости $F(s)$.

При этом поглощенная энергия в джоулях E_s определяется по формуле

$$E_s = \int_0^{s_i} F(s)ds, \quad (7)$$

где s_i – общее перемещение бойка во время разрушения образца, м.

В итоге получается блок-схема преобразования измерительных данных (рис. 5).

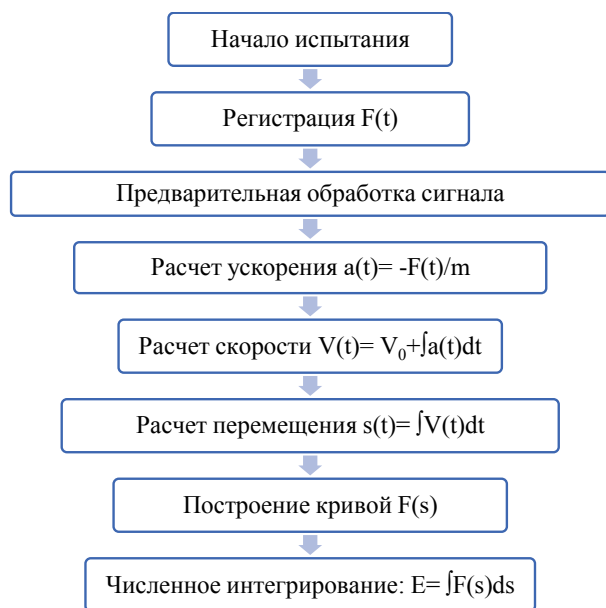


Рисунок подготовлен авторами / The figure is prepared by the authors

Рис. 5. Функциональная блок-схема инструментированных испытаний

Fig. 5. Functional block diagram of instrumented tests

Как описывает [10], результаты измерений энергии разрушения образца, полученные с применением классического маятникового копра, оснащенного угловым энкодером

для измерения углов подъема и взлета маятника, и результаты инструментированного испытания копра имеют значительные отклонения (порядка 10–17 %) при низких значениях энергий и практически совпадают при высоких.

Там же, в [10], отмечено снижение влияния неучтенных факторов подсистемы нанесения удара, т. к. измеряется фактическая сила, действующая на образец.

Например, для инструментированных испытаний интегрирование силы по перемещению рассчитывает работу, совершенную непосредственно над образцом. Вибрационная энергия, оставшаяся в маятнике, в этот расчет не входит.

Инструментированный боёк со встроенным тензометрическим преобразователем силы может калиброваться как в статическом [12], так и в динамическом [13, 14] режимах. Данный подход позволяет обеспечить прослеживаемость измерения энергии к ГЭТ 32–2011. В рамках данной публикации не рассматривались цепочки прослеживаемости к государственному первичному эталону единиц времени и частоты ГЭТ 1–2022¹³ и государственному первичному эталону единицы длины – метра ГЭТ 2–2021¹⁴.

Массовый переход на инструментированный метод Шарпи – это не просто замена одного оборудования другим, это смена парадигмы в контроле качества и сертификации материалов. Применение инструментированного метода Шарпи в Российской Федерации сулит очевидные преимущества в виде повышения точности, объективности, информативности испытаний.

Однако на данном этапе его внедрение сопровождается рядом взаимосвязанных проблем. Статическая калибровка, при которой на тензодатчик бойка медленно подается известная нагрузка, не отражает реальных условий удара. Ударный процесс – это высокоскоростное динамическое событие с резким нарастанием фронта силы, с собственными колебаниями измерительной системы и сложными волновыми процессами в стержнях молота.

¹³ ГЭТ 1–2022 Государственный первичный эталон единиц времени, частоты и национальной шкалы времени.

¹⁴ ГЭТ 2–2021 Государственный первичный эталон единицы длины – метра.

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) измерительного канала должна быть достаточно широкой, чтобы точно зафиксировать эти быстропротекающие процессы без искажений.

Задачи для обеспечения прослеживаемости

Представим некоторые проблемы и подходы к их устранению, реализация которых возможно приведет к обеспечению прослеживаемости.

Создание утвержденной государственной метрологической базы для динамической поверки и калибровки средств измерений силы с требуемыми параметрами (частотами 10–50 кГц и выше), отсутствующей в Российской Федерации. Это создает правовую проблему: даже если лаборатория имеет инструментированный боёк, его показания не могут быть официально признаны при испытаниях или в арбитражных спорах. Допускается его применение только при научных исследованиях.

Мировой опыт подтверждает, что в NIST (США) и PTB (Германия) десятилетиями ведутся работы в этом направлении. Там существуют установки, использующие методы ударного возбуждения, метод возбуждения с помощью синусоидальной силы от вибрационных стендов (метод «фиктивной массы»), методы лазерной интерферометрии для прямого измерения смещения и последующего вычисления ускорения и силы по второму закону Ньютона.

Без такой базы невозможно обеспечить прослеживаемость измерений к государственным эталонам, что является обязательным требованием для аккредитованных лабораторий и признания результатов испытаний на международном уровне.

Обновление нормативно-технической базы. Мир давно живет по стандартам ISO 4965^{15,16} (калибровка динамической силовой измерительной системы) и ASTM E2298-24 (испытание на ударный изгиб с инструментированным бойком). Эти документы детально

описывают процедуры установления метрологической прослеживаемости. Отечественные аналоги, такие как ГОСТ 10708–82 и ГОСТ 25.502–79¹⁷, морально устарели и ориентированы на аналоговую измерительную технику.

Немаловажное значение имеет и экономический аспект. Комплект инструментированного бойка с высокоскоростной системой сбора данных и специализированным программным обеспечением обходится на порядок дороже стандартного бойка для маятникового копра. Добавляются расходы на систематическую (ежегодную или после инцидентов) поверку/калибровку, которая в условиях отсутствия отечественных услуг может требовать отправки оборудования за рубеж, что еще больше увеличивает затраты. По нашим сведениям, в Российской Федерации в настоящее время только одна организация выпускает маятниковые копры, оснащенные инструментированной системой. По понятным причинам, данная система никаким образом не указана в описании типа средства измерений.

Работа на инструментированном коп্রে требует соответствующего уровня подготовки персонала. Если оператор обычного копра, в основном, следит за выполнением механической процедуры, то в случае инструментированных испытаний специалист должен владеть основами динамики, теории колебаний, навыками цифровой обработки сигналов, уметь анализировать осциллограммы, выделять полезный сигнал из шума и корректно интерпретировать результаты.

Международный опыт метрологического обеспечения испытаний на ударную вязкость по методу Шарпи. В международной практике в соответствии с ASTM E23-18 и ISO 148-2 уже много лет для обеспечения прослеживаемости испытаний по методу Шарпи от исходного эталона к маятниковым копрам применяются стандартные образцы, например, по ISO 148-3:2026. Данные образцы позволяют быстро и достоверно проверить все три подсистемы маятникового копра комплексным методом. Они изготавливаются подобно обычным

¹⁵ ISO 4965-1:2012 Metallic materials – Dynamic force calibration for uniaxial fatigue testing. Part 1: Testing systems.

¹⁶ ISO 4965-2:2012 Metallic materials – Dynamic force calibration for uniaxial fatigue testing. Part 2: Dynamic calibration device (DCD) instrumentation.

¹⁷ ГОСТ 25.502–79 Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость.

образцам в соответствии с ISO 148-1:2016, но имеют более строгие требования по геометрическим размерам и дополнительно по однородности характеристик. Для сертификации данных образцов служат специальные эталонные копры, соответствующие так же стандарту ISO 148-3:2026, позволяющие определить значение энергии разрушения и показатели однородности партии образцов. При проведении калибровки, например, согласно ISO 148-2, применяется не менее двух комплектов (по 5 образцов) с разными энергиями, соответствующими применяемому маятнику. По результатам испытания этих образцов непосредственно определяется погрешность калибруемого копра, а также оценивается состояние подсистемы нанесения удара и разрушения образца.

Отметим, что несмотря на высокие требования эталонных копиров по ISO 148-3:2026, из-за особенностей подсистемы нанесения удара и разрушения образца результаты сертификации стандартных образцов также будут иметь неисключенное смещение приписанного значения в сторону больших энергий. Внедрение инструментированной измерительной системы в эталонные копры по ISO 148-2 позволит снизить (но не исключить полностью) влияние

неучтенных факторов подсистемы нанесения удара, а также обеспечить прослеживаемость измерений к эталонам силы.

Систематизация данных подходов в обеспечении прослеживаемости от государственных первичных эталонов к маятниковым копрам позволяет построить один из вариантов структурной схемы (рис. 6).

В структурной схеме передачи единицы силы от ГЭТ 32–2011 к рабочим маятниковым копрам предлагается предусмотреть две ветви, обеспечивающие передачу как непосредственно единицы силы к инструментированным копрам, так и поглощенной энергии к обычным маятниковым копрам с применением рабочих эталонов (мер, образцов) однократного применения.

Передача единицы силы от ГЭТ 32–2011 к рабочим эталонам единицы силы на основе машин для испытаний металлов на двухпорный ударный изгиб по методу Шарпи может осуществляться с применением эталонных силовоспроизводящих машин 1-го разряда как в статическом, так и в динамическом режимах. Данные рабочие эталоны должны состоять из эталонного(-ых) по ISO 148–3:2016 инструментированного маятникового копра и инфраструктуры для обеспечения прослеживаемости.

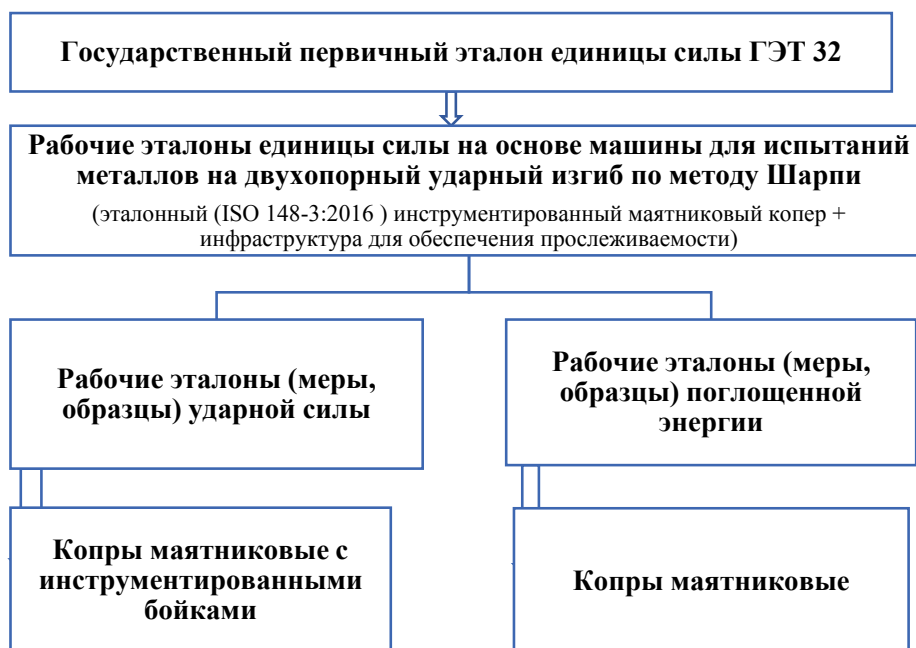


Рисунок подготовлен авторами / The figure is prepared by the authors

Рис. 6. Структурная схема обеспечения прослеживаемости

Fig. 6. Structural diagram of traceability assurance

Тип этих образцов может быть утвержден и как тип средства измерений (образцы как меры), и как тип стандартных образцов. Кроме того, они могут применяться, например, при межлабораторных сличительных испытаниях (проверке квалификации), предназначенных для проверки правильности работы испытательных лабораторий.

Также стоит отметить, что в МИ 2314–2006¹⁸ копры маятниковые отнесены к средствам измерений силы: код раздела области измерений 2811, наименование группы «Машины испытательные прочие».

Заключение

В статье описаны проблемы метрологического обеспечения испытаний металлов по методу Шарпи, который реализован в более чем в 1 500 официально эксплуатируемых в Российской Федерации маятниковых копрах.

Выявлено, что существующая практика проверки маятниковых копров контролирует лишь подсистемы воспроизведения и измерения удара, зачастую игнорируя критическое влияние подсистемы нанесения удара и разрушения образца. Паразитные потери энергии на трение, вибрации и «неидеальность» механики приводят к систематическому завышению результатов измерений работы удара (поглощенной энергии), что ставит под сомнение достоверность результатов испытаний и может привести к признанию некондиционной продукции годной, что создает серьезные риски для безопасности.

Инструментированные испытания, основанные на прямом измерении силы в процессе удара, позволяют исключить влияние паразитных потерь и обеспечивают прямую прослеживаемость к Государственному первичному эталону единицы силы ГЭТ 32–2011. В дальнейшем планируется проведение дополнительных исследований для установления цепочек прослеживаемости к ГЭТ 1–2022 и ГЭТ 2–2021.

Применение стандартных образцов утвержденного типа (сертифицированных стандартных образцов) для комплексной проверки копров является эффективным и практичным

методом, позволяющим оценить состояние всех его подсистем, особенно связанных с механикой нанесения удара. Такой подход широко используется в международной практике, например в соответствии в ASTM E23-18 и ISO 148-2, и может быть внедрен в отечественную систему обеспечения единства измерений.

Предложены следующие основные схемы по обеспечению прослеживаемости измерений при испытаниях на ударную вязкость.

1. Прослеживаемость к действующему Государственному первичному эталону единицы силы ГЭТ 32–2011. Предлагается двухуровневая структурная схема, включающая передачу единицы силы непосредственно к эталонным инструментированным копрам с дальнейшей ее передачей:

– или эталонным образцам силы, применяемым для определения метрологических характеристик инструментированных копров общего назначения;

– или образцам поглощенной энергии, применяемым для определения метрологических характеристик обычных (классических) маятниковых копров.

2. Прослеживаемость к совершенствуемым государственным первичным эталонам ГЭТ 32–2011 или ГЭТ 57–84¹⁹. Появляется упрощенная двухуровневая схема: единица силы передается к соответствующим образцам непосредственно от одного из первичных эталонов;

Реализация любой из описанных выше схем требует системного подхода к разработке документов (включая государственные поверочные схемы) по метрологическому обеспечению маятниковых копров и их внедрению в метрологическую практику, и в создании эталонной базы – в этой связи предлагается:

– совершенствование ГЭТ 32–2011 или ГЭТ 57–84 путем включения в их состав высокоточного (соответствующего ISO 148-3:2016) инструментированного маятникового копра с динамически калиброванным силоизмерительным каналом;

– разработка и утверждение типа (сертификация) эталонных образцов ударной силы

¹⁸МИ 2314–2006 Государственная система обеспечения единства измерений. Кодификатор групп средств измерений.

¹⁹ГЭТ 57–84 Государственный первичный специальный эталон единицы ускорения при ударном движении.

и (или) поглощенной энергии, прослеживаемых к ГЭТ 32–2011 или ГЭТ 57–84;

– разработка единого документа на методику поверки маятниковых копров;

– распространение действия данного документа на все эксплуатируемые в РФ копры.

В более широком контексте реализация представленных в настоящей публикации предложений позволит замкнуть цепь метрологической прослеживаемости на практике и обеспечить достоверность и согласованность результатов испытаний, обеспечивающих фундамент безопасности и надежности российских отраслей промышленности.

Благодарности: Автор выражает благодарность К. К. Савровскому за ценные замечания при подготовке статьи.

Acknowledgments: The author expresses their gratitude to K. K. Savrovsky for the valuable comments during the preparation of the article.

Конфликт интересов: Автор декларирует отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи. Работа выполнена в рамках

диссертационного исследования «Разработка методов измерений силы сопротивления ударному двухопорному изгибу по методу Шарпи». Научный руководитель: Шмигельский И. Ю., канд. техн. наук, руководитель научно-исследовательской лаборатории госэталонов в области измерений массы и силы ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»

Conflict of interest: The author declares the absence of any obvious or potential conflicts of interest related to this manuscript. The work was carried out within the framework of the dissertation research “Development of methods for measuring the impact force in Charpy tests.” Scientific supervisor: Ilya Yu. Shmigelskiy, Cand. Sci (Eng.), of the Research Laboratory of State Standards in the Field of Mass and Force Measurements of the D. I. Mendeleyev Institute for Metrology.

Финансирование: Это исследование не получало финансовой поддержки в виде гранта от какой-либо организации государственного, коммерческого или некоммерческого сектора.

Funding: This research did not receive financial support in the form of a grant from any governmental, for-profit, or non-profit organizations.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Лаврентьев Н. Д., Максютин И. В., Погуляев С. И. Экспериментальное обоснование нового подхода к оценке степени опасности механических дефектов на магистральных газопроводах // Вести газовой науки. 2022. № 1 (50). С. 94–100.
2. Оценка критической температуры перехода в хрупкое состояние конструкционных сталей, эксплуатирующихся в Арктическом регионе / Л. Г. Петрова [и др.] // Проблемы экспертизы в автомобильно-дорожной отрасли. 2023. № 2 (7). С. 59–70.
3. Петрова Л. Г. Металловедческая экспертиза разрушений конструкций по причине хладноломкости: исторический обзор // Проблемы экспертизы в автомобильно-дорожной отрасли. 2022. № 2 (3). С. 29–46.
4. Испытания на ударную вязкость. Действующие стандарты и перспективы развития отечественной нормативной базы / Д. Д. Заботкин [и др.] // Механометрика : Материалы конференции «Механометрика 2025. Механические измерения и испытания», г. Санкт-Петербург, 1–3 июля 2025 года / ВНИИМ им. Д. И. Менделеева. Санкт-Петербург: ВНИИМ, 2025. С. 17–18.
5. Зайцев Г. П. О сравнимости показаний маятниковых копров // Заводская лаборатория. 1938. № 11.
6. Бейль С. Я. К вопросу о сравнимости показаний маятниковых копров различных конструкций // Исследования в области механических измерений: Труды ВНИИМ. Выпуск 1 (61) / Под редакцией В. Г. Махровского. Ленинград : ВНИИМ, 1948. С. 91–104.
7. Ченцова Ю. С., Толмачев В. В., Забелина А. А. Оценивание неопределенности при испытаниях на ударный изгиб с использованием стандартного образца // Эталоны. Стандартные образцы. 2023. Т. 19, № 4. С. 143–150. <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2023-19-4-143-150>
8. Driscoll D. E. Reproducibility of Charpy Impact Test // ASTM Special Technical Publication. 1955. STP 176. P. 3–15. <https://doi.org/10.1520/STP47578S>
9. Fahey N. H. The Charpy Impact Test – its accuracy and factors affecting test results. In: Driscoll D. E. (ed.). Impact Testing of Metals, ASTM STP 466, ASTM International, 1970, pp. 76–92. <https://doi.org/10.1520/STP32057S>

10. Manahan M. P., Stonesifer R. B. The difference between total absorbed energy measured using an instrumented striker and that obtained using an optical encoder // *Pendulum Impact Testing: A Century of Progress*. W. Conshohocken: ASTM, 2000. P. 181–197.
11. Vigliotti D. P., Siewert T. A., McCowan C. N. Maintaining the accuracy of Charpy Impact machines // *Pendulum Impact Testing: A Century of Progress*. W. Conshohocken: ASTM, 2000. P. 134–145.
12. Influence of loading rate on the calibration of instrumented Charpy strikers / E. Lucon [et al.] // *Journal of Testing and Evaluation*. 2009. Vol. 37, Iss. 6. P. 520–530. <https://doi.org/10.1520/JTE102330>
13. Vlajic N., Chijioke A. Traceable dynamic calibration of force transducers by primary means // *Metrologia*. 2016. Vol. 53, № 4. P. S136. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/53/4/S136>
14. Investigations on SI-Traceable dynamic calibration of instrumented Charpy Strikers / A. Chijioke [et al.] // Technical Note (NIST TN), National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD. 2018. URL: <https://doi.org/10.6028/NIST.TN.1991>.

REFERENCES

1. Lavrentyev ND, Maksyutin IV, Pogulyaev SI. Experimental validation of a new concept in assessing severity of mechanical defects at trunk gas pipelines. *Vesti Gazovoy Nauki*. 2022;1(50):94–100. (In Russ.).
2. Petrova LG, Belashova IS, Demin PE, Frolov MA. Evaluation of the critical temperature of transition to brittle state of construction steels operating in the arctic region. *Automotive end Road expert evaluation*. 2023;2(7):59–70. (In Russ.).
3. Petrova LG. Metallurgical examination of structural failures due to cold brittleness: A historical overview. *Automotive end Road expert evaluation*. 2022;2(3):29–46. (In Russ.).
4. Zabotkin DD, Dunaev AV, Sazonov SM, Kotova OK. Impact toughness tests. Current standards and prospects for the development of the domestic regulatory framework. In: *Mekhanometrika 2025. Mechanical measurements and tests: Collection of abstracts of reports of the international scientific and technical conference*, 1–3 July 2025, St. Petersburg, Russia. St. Petersburg: VNIIM; 2025. P. 17–18. (In Russ.).
5. Zaitsev GP. On the comparability of pendulum impact tester readings. *Industrial Laboratory*. 1938;11. (In Russ.).
6. Beil SYa. On the question of the comparability of readings of pendulum impact testers of various designs. In: *Research in the field of mechanical measurements: Trudy VNIIM*. Issue 1 (61). VG Mahrovskij (eds.). Leningrad: VNIIM; 1948. P. 91–104. (In Russ.).
7. Chentsova YuS, Tolmachev VV, Zabelina AA. Estimation of uncertainty in Charpy Pendulum Impact Test using the reference material. *Measurement Standards. Reference Materials*. 2023;19(4):143–150. (In Russ.). <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2023-19-4-143-150>
8. Driscoll DE. Reproducibility of Charpy Impact Test. *ASTM Special Technical Publication*. 1955;176:3–15. <https://doi.org/10.1520/STP47578S>
9. Fahey NH. The Charpy Impact Test – its accuracy and factors affecting test results. In: Driscoll DE (ed.). *Impact Testing of Metals*, ASTM STP 466, ASTM International, 1970, pp. 76–92. <https://doi.org/10.1520/STP32057S>
10. Manahan MP, Stonesifer RB. The difference between total absorbed energy measured using an instrumented striker and that obtained using an optical encoder. In: *Pendulum Impact Testing: A Century of Progress*. W. Conshohocken: ASTM; 2000. P. 181–197.
11. Vigliotti DP, Siewert TA, McCowan CN. Maintaining the accuracy of Charpy Impact machines. In: *Pendulum Impact Testing: A Century of Progress*. W. Conshohocken: ASTM; 2000. P. 134–145.
12. Lucon E, Scibetta M, McColskey JD, McCowan CN. Influence of loading rate on the calibration of instrumented Charpy strikers. *Journal of Testing and Evaluation*. 2009;37(6):520–530. <https://doi.org/10.1520/JTE102330>
13. Vlajic N, Chijioke A. Traceable dynamic calibration of force transducers by primary means. *Metrologia*. 2016;53(4): S136. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/53/4/S136>
14. Chijioke A, Vlajic N, Lucon E, Mulhern E. Investigations on SI-Traceable dynamic calibration of instrumented Charpy Strikers. Technical Note (NIST TN), National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD. 2018. Available at: <https://doi.org/10.6028/NIST.TN.1991>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Гладышев Евгений Евгеньевич – начальник отдела промышленной метрологии, ФБУ «Государственный региональный центр стандартизации, метрологии и испытаний в Нижегородской области»
603950, г. Нижний Новгород, ул. Республиканская, д. 1
e-mail: gladyshev@nncsm.ru
<https://orcid.org/0009-0000-2410-876X>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Evgeny E. Gladyshev – Head of the Department of Industrial Metrology, Center for Standardization and Metrology of Rosstandart for Nizhniy Novgorod Region
1 Respublikanskaya st., Nizhny Novgorod, 603950, Russia
e-mail: gladyshev@nncsm.ru
<https://orcid.org/0009-0000-2410-876X>