

На правах рукописи

Никазов Артём Александрович



**РАЗРАБОТКА СРЕДСТВ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО
ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ ТВЕРДОСТИ
МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ ПО
МЕТОДУ ЛИБА**

*Специальность 05.11.13 – Приборы и методы контроля
природной среды, веществ, материалов и изделий*

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2022

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет».

Научный руководитель –
доктор технических наук, доцент

Сясько Владимир Александрович

Официальные оппоненты:

Федоров Алексей Владимирович

доктор технических наук, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО», факультет систем управления и робототехники, доцент;

Гордиенко Валерий Евгеньевич

доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет», кафедра металлических и деревянных конструкций, профессор.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э.Баумана (национальный исследовательский университет)», г. Москва.

Защита диссертации состоится 24.05.2022 г. в 12.00 на заседании диссертационного совета ГУ 212.224.14 Горного университета по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, ауд. № 1171а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Горного университета и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 24 марта 2022 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



КОПТЕВА
Александра Владимировна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Твердость – одна из важнейших механических характеристик материалов. Ее измерения широко распространены в промышленности при контроле технологических процессов, определении эксплуатационных характеристик изделий, выборе режимов механической обработки и типа режущего инструмента.

Большинство распространенных на сегодняшний день методов измерения твердости были разработаны в начале прошлого века. Развитие промышленных технологий неизбежно привело к созданию и распространению новых методов измерения твердости, в том числе портативных твердомеров, позволяющих проводить оперативный контроль сложных изделий, в отличие от стационарных твердомеров, применяемых в лабораторных условиях. К таким портативным твердомерам относятся, в частности, твердомеры, реализующие метод Либа.

При использовании приборов нового типа неизбежно возник вопрос сопоставления результатов измерений новыми методами со значениями, выраженными в общепринятых шкалах твердости, которые, как правило, указываются в конструкторской и технологической документации. Числа твердости, относящиеся к шкалам порядка, не могут быть связаны между собой математическими зависимостями. Существуют стандартизованные таблицы взаимного перевода различных шкал твердости, однако они действуют только для ограниченного перечня материалов и носят справочный характер. Частным решением этой проблемы является индивидуальная градуировка портативных приборов для конкретных типов материалов. Более универсальный подход – стандартизация новых шкал и создание для них системы метрологического обеспечения, включая разработку и утверждение государственных первичных эталонов и поверочных схем для применения их в сфере государственного регулирования в соответствии с ФЗ-102 «Об обеспечении единства измерений».

Повсеместное широкое распространения твердомеров по шкалам Либа делает задачу создания метрологического обеспечения этих приборов крайне своевременной и актуальной. Обеспечение прослеживаемости результатов измерений невозможно без

разработки иерархической схемы передачи единицы твердости по шкале Либа (поверочной схемы) и ее ключевых элементов – эталонных установок и мер твердости по шкалам Либа, а также государственного первичного эталона.

Стандартизация метода измерения твердости по Либу имеет важное практическое значение, ввиду широкого распространения портативных динамических твердомеров, эксплуатирующихся на отечественных предприятиях энергетики, транспорта и военно-промышленного комплекса. Разработка принципов построения и оптимизации параметров прототипа эталонной установки твердости по Либу и методики исследования его метрологических характеристик, а также технологии изготовления и методики исследования метрологических характеристик эталонных мер твердости по шкале Либа позволят реализовать схему передачи единицы твердости по шкале Либа и повысить достоверность и точность результатов измерений за счёт соблюдения требований стандартов и обеспечения прослеживаемости к первичному эталону.

Степень разработанности темы исследования

Изучением теоретических и практических основ методов динамического индентирования занимались ряд зарубежных ученых: D. Tabor, D.H. Leeb, M. Kompatscher, K. Herrmann, а также отечественные специалисты: Н.Н. Давиденков, Ю.Г. Артемьев, В. А. Рудницкий, Г. А. Крень, А.В. Федоров, К.В. Гоголинский, В.А. Сясько. В настоящее время метрологическое обеспечение измерений твердости по Либу основано на прослеживаемости к первичным эталонам, воспроизводящим основные шкалы данного метода. Такие эталоны имеются, по меньшей мере, в Германии и Китае. Передача шкал твердости рабочим средствам измерений обеспечивается мерами, разработанными специально для метода Либа. В Российской Федерации динамические твердомеры проходят испытания в целях утверждения типа и вносятся в Государственный реестр средств измерений под видом твердомеров по стандартизованным шкалам (Бринелля, Виккерса, Роквелла).

Несмотря на довольно большую историю разработки и применения динамических твердомеров, в России только в 2019 году утвержден стандарт ГОСТ Р 8.969-2019 на основе ISO 16859-1:2015, посвященный методу измерений по шкалам Либа. При этом

2 и 3 часть стандарта ISO, посвященные требованиям к твердомерам, мерам твердости и методикам их калибровки в настоящее время не гармонизированы. В настоящее время в России имеется эталонная установка твердости по шкалам Либа, утвержденная в статусе Государственного первичного эталона (ГПЭ). Однако, утвержденная 2-х ступенчатая поверочная схема, подразумевающая передачу значений твердости рабочим эталонным мерам непосредственно от ГПЭ, не может обеспечить потребность промышленности в метрологическом обеспечении твердомеров Либа, т.к. в настоящее время в РФ эксплуатируются несколько тысяч таких приборов, при этом рабочие меры Либа должны использоваться не только при их первичной и периодической поверке, но и для регулярной проверки перед началом работы. В связи с этим существует необходимость утверждения 4-х ступенчатой поверочной схемы и оснащения региональных ЦСМ эталонными установками, а также налаживание массового производства рабочих эталонных мер твердости. Кроме того, в существующей поверочной схеме установлены требования только для двух шкал Либа HLD и HLG, что ограничивает потенциал внедрения других стандартизованных шкал твердости Либа.

Цель работы - повышение точности и достоверности результатов контроля механических свойств портативными динамическими твердомерами путем создания системы метрологического обеспечения измерений твердости по методу Либа.

Поставленная в диссертационной работе цель достигается посредством решения нижеуказанных **задач**:

1. Провести анализ и исследование методов и средств измерений твердости металлов, а также существующих вариантов методов измерений и практической реализации портативных устройств для измерения твердости.

2. Разработать модель процесса измерений твердости по методу Либа, учитывающую влияющие величины.

3. Разработать структуру иерархической схемы передачи единицы твердости по шкалам Либа (проект поверочной схемы), обеспечивающую прослеживаемость результатов измерений твердости к первичному эталону.

4. Разработать принципы построения эталонной установки твердости по шкалам Либа и способы улучшения ее параметров.

5. Определить требования и разработать технологию изготовления мер твердости по шкалам Либа.

6. Разработать методики оценки неопределенности эталонных установок, мер и рабочих средств измерений твердости по шкалам Либа, и провести исследования метрологических характеристик разработанной эталонной установки твердости и эталонных мер твердости по Либу.

Идея работы: применение гравитационного разгона ударника и прямого измерения скорости удара в эталонных установках по шкалам Либа позволит реализовать воспроизведение и передачу шкал твердости Либа с точностью и достоверностью, необходимыми для обеспечения единства измерений в РФ.

Объектом исследования является система метрологического обеспечения средств измерений твердости по шкалам Либа.

Предметом исследования являются научно-технические и методические аспекты реализации эталонных установок и мер твердости, а также методик их калибровки для обеспечения единства измерений твердости по шкалам Либа.

Научная новизна работы:

1. Впервые разработана модель процесса измерения твердости по методу Либа, учитывающая влияние физических свойств и геометрических параметров измерительного преобразователя и испытуемого образца на результаты измерений.

2. Предложена и обоснована 4-х ступенчатая структура иерархической схемы передачи единицы твердости по шкалам Либа (проект поверочной схемы), основанная на совместном использовании поэлементной аттестации и калибровки по мерам твердости рабочих эталонных установок и средств измерений.

3. Разработана новая методика определения метрологических характеристик эталонных установок по шкалам Либа, воспроизводящих единицу твердости по методу Либу и обеспечивающих передачу значений твердости по шкалам Либа мерам твердости и рабочим средствам измерений (твердомерам).

Теоретическая и практическая значимость работы:

Разработана, изготовлена и исследована эталонная установка, соответствующая эталонной установке 2-го разряда по шкале Либа в рамках предложенного проекта поверочной схемы.

2. Разработана технология изготовления рабочих мер твердости по Либу и исследованы их метрологические характеристики.

3. Разработаны методики калибровки эталонных установок и мер твердости по методу Либа.

4. Разработанные метрологические методы и средства могут быть использованы для построения системы обеспечения единства измерений твердости по шкалам Либа в Российской Федерации.

5. Разработанная установка используется в ООО «КОНСТАНТА» для проведения исследований и калибровочных работ. При утверждении предложенной Государственной поверочной схемы шкал твердости Либа данную установку планируется аттестовать и использовать в качестве эталонной установки 2-го разряда.

Методология и методы исследования. Теоретические исследования построены на основе положений физики прочности и пластичности, а также механики твердого деформируемого тела. Исходя из этих исследований произведена оценка вклада мешающих параметров в погрешность результатов измерений. Основные параметры разработанного прототипа эталонной установки основаны на теоретическом анализе, расчетах и требованиях нормативно-технической документации.

На защиту выносятся следующие положения:

1 Зависимость результатов измерений твердости по методу Либа от физико-механических, геометрических и энергетических параметров первичных измерительных преобразователей, а также предела текучести и продольного модуля упругости материала испытуемого образца, требует нормирования скорости удара и массы ударника, а также механических свойств и радиуса его наконечника для обеспечения единства измерений твердости по шкалам Либа.

2. Система метрологического обеспечения шкал твердости по методу Либа, включающая иерархическую схему передачи единицы в составе первичного эталона, мер твердости 1-го разряда, эталонной установки второго разряда, мер твердости 2-го разряда, с учетом достигнутых параметров разработанной установки и мер твердости, соответствующих эталонной установке и мерам твердости 2-го разряда, обеспечивает неопределенность измерений твердости по шкалам Либа в соответствии с требованиями международных стандартов и национальных стандартов РФ.

Степень достоверности результатов исследования подтверждается теоретическим обоснованием процесса измерения твердости различными методами, сравнением с результатами, полученными в известных работах, а также проверкой результатов многочисленными экспериментами. Результаты диссертационной работы использованы при разработке средств и методов метрологического обеспечения твердомеров по шкалам Либа, производимых в ООО «Константа». Полученные результаты позволили успешно проходить процедуры калибровки твердомеров «Константа КТ» в Германии и Чехии и подтверждать их соответствие требованиям международных стандартов.

Апробация результатов. Основные положения и результаты диссертационной работы в целом и отдельные ее разделы докладывались и получили положительные оценки на конференциях и семинарах: Практический семинар «Оборудование производства ООО «АКС» для ультразвукового контроля металлов, пластмасс и бетона» (г. Энгельс, 2015); Международная научно-практическая конференция «Внедрение результатов инновационных разработок: проблемы и перспективы» (г. Екатеринбург, 2016); II Международная научно-практическая конференция «Измерительная техника и технологии контроля параметров природных и техногенных объектов минерально-сырьевого комплекса» (г. Санкт-Петербург, 2019); XXII Всероссийская конференция по неразрушающему контролю и технической диагностике", Москва, 3 – 5 марта 2020 г.

Личный вклад автора в работу заключается в постановке целей и задач теоретических и экспериментальных исследований, анализе зарубежной и отечественной научной литературы по теме

исследования, формулировке научных положений, непосредственном участии в разработке и исследовании метрологических характеристик разработанной установки и мер твердости по шкалам Либа, а также разработке методик их калибровки.

Публикации по работе. Результаты диссертационной работы в достаточной степени освещены в 9 печатных работах, в том числе в 3 статьях - в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 2 статьях - в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получено 1 свидетельство на программу для ЭВМ.

Структура работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и библиографического списка. Содержит 127 страниц машинописного текста, 30 рисунков, 19 таблиц, список литературы из 101 наименования и 4 приложения на 9 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана общая характеристика работы, обоснована ее актуальность, сформулированы цель, задачи исследования, научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе приведен анализ современного состояния методов и средств измерений твердости, в том числе портативными твердомерами, реализующими метод Либа.

В 1975 г. Дитмар Либ по результатам изучения различных портативных устройств для измерения твердости, основанных на методах Баумана-Штейнрюка, Шмидта и Шора, разрабатывает новый метод, суть которого заключается в измерении соотношения скоростей v_i падающего ударника до и после соударения с поверхностью испытуемого образца (Рисунок 1). Твердость по Либу HL рассчитывается в соответствии с формулой (1):

$$HL = 1000 \frac{v_R}{v_A} \quad (1)$$

где v_R – скорость отскока ударника; v_A – скорость удара.

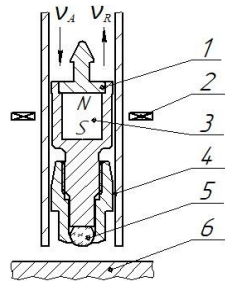


Рисунок 1 – Схема измерения твердости по Либу: 1 – корпус ударника, 2 – катушка индуктивности, 3 – постоянный магнит (N-северный полюс, S-южный полюс), 4 – направляющая трубка; 5 – сферический наконечник; 6 – испытуемый образец

Главная идея Либса заключается в том, чтобы измерить скорость удара и отскока бесконтактно - через ЭДС, генерируемую движущимся магнитом сквозь катушку индуктивности, установленную на направляющей трубке устройства. Наведенная ЭДС пропорциональна скорости магнита, установленного внутри ударника. Сигнал наведенной ЭДС (Рисунок 2) записывается в электронном блоке с индикатором, и пиковые значения индуцированного напряжения используются для получения чисел твердости Либса НЛ.

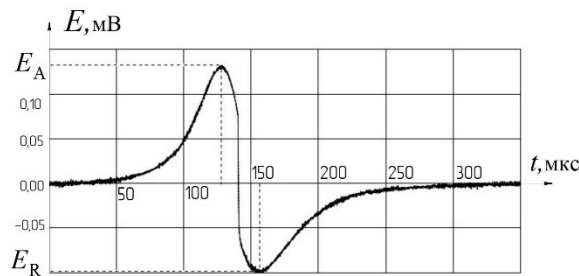


Рисунок 2 – Диаграмма ЭДС $e(t)$, наведенной на катушке индуктивности при измерении твердости

Портативные динамические твердомеры, основанные на методе Либса, широко распространены в мире. В РФ они применяются, в том числе, для контроля сварных швов при

строительстве магистральных газопроводов, на предприятиях ГК «Росатом» и на других ответственных промышленных объектах, в том числе в сферах государственного регулирования в соответствии с ФЗ-102 «Об обеспечении единства измерений»

В настоящее время во ФГУП ВНИИФТРИ на базе установки, изготовленной фирмой PROCEQ, была разработана эталонная установка твердости по шкалам Либа, утверждённая в статусе Государственного первичного эталона. В существующей поверочной схеме установлены требования только для двух шкал Либа HLD и HLG, что ограничивает потенциал внедрения других стандартизованных шкал Либа. Критической проблемой является утверждение 2-х ступенчатой поверочной схемы, предусматривающей поверку рабочих эталонных мер непосредственно на ГПЭ, что не позволяет обеспечить потребности промышленности, учитывая размеры территории РФ, а также число твердомеров, находящихся в эксплуатации. Как результат, утверждение ГПЭ не решило проблему обеспечения единства измерений твердости твердомерами по шкалам Либа и не прекратило практику испытаний и поверки динамических твердомеров как средств измерения по статическим шкалам твердости. Таким образом, несмотря на определенный прогресс в развитии метрологического обеспечения шкал твердости по Либу в РФ, эта задача еще далека от окончательного решения.

Предлагаемые мероприятия позволят значительно повысить уровень промышленной безопасности и вероятность безаварийной работы оборудования.

Исходя из результатов проведенного анализа, в конце первой главы были сформулированы цель и задачи научного исследования.

Во второй главе приведен анализ процесса взаимодействия ударника твердомера Либа с испытуемым образцом (ИО) и проведена расчетная оценка влияния параметров измерительного преобразователя на результат измерения твердости по методу Либа. Определены требования для средств измерений и рабочих эталонов.

Для определения нормируемых параметров средств измерений был произведен теоретический анализ взаимодействия ударника с поверхностью ИО на основе квазистатического подхода с применением методов контактной механики. По результатам

анализа было определено, что коэффициент восстановления e , определяемый как отношение скорости отскока ударника от поверхности испытуемого образца v_R и скорости удара v_A ($e = v_R/v_A$), описывается следующим аналитическим выражением (2):

$$e \approx 3.8(Y_d/E^*)^{1/2} \left(\frac{1}{2} m v_A^2 / Y_d R^3 \right)^{-1/8}, \quad (2)$$

где m и R – масса ударника и радиус наконечника, Y_d – динамический предел текучести материала ИО, E^* – приведенный модуль упругости, рассчитываемый из соотношения: $1/E^* = (1 - \nu_1^2/E_1) + (1 - \nu_2^2/E_2)$, где ν_1, ν_2 – коэффициенты Пуассона и E_1, E_2 – модули упругости для взаимодействующих материалов.

Таким образом, коэффициент восстановления e , как следствие, твердость по шкале Либа зависит от значений предела текучести, модуля Юнга и коэффициента Пуассона ИО и является функцией следующих параметров измерительной установки: скорости удара v_A , массы ударника m , радиуса наконечника R , а также модуля Юнга и коэффициента Пуассона наконечника. Следовательно, для обеспечения единства измерений твердости по шкалам Либа необходимо нормировать номинальные значения указанных параметров измерительных установок, а также их предельные отклонения. В представленной работе во всех расчетах использованы номинальные значения и предельно допустимые отклонения, установленные в стандартах ГОСТ Р 8.969-2019 и ISO 16859-1-3:2015 для наиболее распространенной шкалы Либа D без потери общности относительно других шкал Либа. Для оценки влияния отклонения указанных параметров и суммарной относительной неопределенности результатов измерений твердости по Либу были рассчитаны значения относительных отклонений $\frac{\Delta e(\Delta x_i)}{e}$ по каждому параметру x_i ($i \in \{v, m, R\}$) при номинальных значениях указанных параметров на основе частных производных уравнения (2) в соответствии с общим выражением (3):

$$\Delta e(\Delta x_i) = \frac{\partial e}{\partial x_i} \Delta x_i, \quad (3)$$

где Δx_i – предельно допустимое отклонение соответствующего параметра.

Суммарная относительная неопределенность измерительной установки, связанная с погрешностью параметров установки, рассчитывается по формуле (4):

$$\Delta e_{\Sigma} = \sqrt{\sum_i \left(\frac{\Delta e(\Delta x_i)}{e} \right)^2}, \quad (4)$$

где $i \Leftrightarrow v, m, R$.

На основании анализа процессов, происходящих при измерении твердости динамическими методами, а также изучения применяемых конструктивных решений была составлена обобщенная структурная схема средств измерений твердости по шкале Либа с учетом параметров, влияющих на результаты измерения (Рисунок 3).

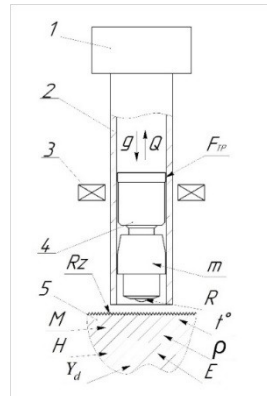


Рисунок 3 – Обобщенная структурная схема средств измерений твердости по шкале Либа с учетом влияющих параметров: 1 – блок удержания и разгона/сброса ударника, 2 – направляющая трубка, 3 – узел измерения скоростей v_A и v_R , 4 – ударник, 5 – испытуемый образец (ИО). Где E - модуль упругости ИО, Y_d - динамический предел текучести, m - масса ударника, R - радиус сферического наконечника, M - масса ИО, H - толщина ИО, ρ - плотность ИО, t° - температура окружающей среды и ИО, Rz - шероховатость поверхности ИО, g - ускорение свободного падения, Q - сила сопротивления воздуха, $F_{тр}$ - сила трения, возникающая между стенками направляющей трубки и ударником.

Вывод: установлено, что для обеспечения единства измерений твердости по шкалам Либа необходимо нормировать (установить номинальные значения и предельно допустимые отклонения) и контролировать следующие параметры первичных преобразователей: скорость удара v_d , массу ударника m , радиус наконечника R , а также физико-механические свойства материала сферического наконечника. Выполненные расчеты показывают, что при соблюдении требований, установленных стандартами, предельное относительное отклонение измеряемого значения твердости для эталонов и средств измерений по шкале Либа D вследствие отклонений контролируемых параметров не превышают 0,1 % для эталонных установок и 1,7 % для рабочих средств измерений.

В третьей главе представлен анализ нормируемых параметров эталонных установок и мер, используемых при воспроизведении и передаче шкал Либа, а также средств измерений твердости по шкалам Либа. По результатам анализа разработан проект иерархической схемы передачи единицы твердости по шкале Либа (проект поверочной схемы).

В настоящее время требования к метрологическим характеристикам средств измерений по Либу регламентированы рядом международных стандартов. В частности, стандарт ISO 16859, состоящий из 3-х частей, устанавливает требования, которые предъявляются к техническим параметрам измерительных преобразователей при поэлементной поверке (калибровке), требования к метрологическим характеристикам мер твердости, а также метрологическим характеристикам рабочих средств измерений при косвенной поверке (калибровке) по мерам твердости.

Для решения задачи обеспечения единства измерений твердости по шкалам Либа в Российской Федерации предлагается утвердить поверочную схему в соответствии с ГОСТ 8.061-80 на основе разработанного проекта поверочной схемы (Рисунок 4) и требований международных стандартов. Разработанные требования к элементам поверочной схемы указаны в таблицах 1-4.

Вывод: разработанный проект поверочной схемы позволит обеспечить единство измерений твердости по шкалам Либа в Российской Федерации, их соответствие международным

стандартам, а также повышение экспортного потенциала приборов отечественного производства.

В четвертой главе приведен анализ конструктивных решений для разработки прототипа эталонной установки 2-го разряда, предложена конструкция и изготовлен экспериментальный образец установки с двухкатушечной системой измерения скорости удара и отскока.

Для разработки прототипа эталона твердости 2-го разряда были проанализированы конструктивные решения механизмов разгона ударника и системы измерения его скорости. Изучены и испытаны схемы с пружинным и гравитационным разгоном ударника. В результате, для пружинного метода разгона ударника разброс максимального значения ЭДС, соответствующий разбросу скорости ударника, составил $\pm 5\%$, что соответствует разбросу, нормированному для рабочих твердомеров, но не удовлетворяет требованиям для эталонных установок.

Для гравитационного метода разгона ударника были оценены влияния высоты сброса, угла наклона преобразователя и ускорения свободного падения на значение v_A и были определены допустимые отклонения рассматриваемых параметров измерительной установки.

По результатам анализа конструктивных решений, применяемых в зарубежных эталонных установках, была предложена схема, в которой измерение v_A осуществляется с помощью конструкции, состоящей из двух катушек индуктивности, расположенных друг от друга на расстоянии l , и постоянного магнита, встроенного в ударник, по результатам анализа наведенных в них импульсов ЭДС, имеющих временной сдвиг. Были определены предельные расчетные отклонения и осуществлена оценка требуемых значений неопределенности параметров эталонной установки. (Таблица 5). Критерием оценки является величина предельного относительного отклонения скорости ударника при заданном отклонении $0,0025$ м/с для номинального значения скорости $2,05$ м/с, равная $0,12\%$.

С учетом установленных требований разработан прототип эталонной установки 2-го разряда (Рисунок 5).

Вывод: На основании анализа различных вариантов конструктивных решений, а также оценки предельно допустимых отклонений влияющих параметров разработан и изготовлен экспериментальный образец эталонной установки 2-го разряда в соответствии с предложенным проектом поверочной схемы и произведены теоретические исследования его метрологических характеристик.

В пятой главе приведены результаты исследования метрологических характеристик разработанного экспериментального образца эталонной установки 2-го разряда.

Было проанализировано влияние температуры на высоту сброса ударника. При изменении $\Delta T^{\circ}\text{C}$ в диапазоне $\pm 5^{\circ}\text{C}$ изменение не превысит величины $\Delta H_1 = 110 \cdot 10^{-6}$ м, что, в свою очередь, приведет к систематической погрешности задания скорости ударника $\pm 0,00022$ м/с.

Измеряя время пролета между центрами катушек осциллографом и скорость падения ударника интерферометрической установкой было рассчитано действительное расстояние между центрами катушек, которое составило $(4,680 \pm 0,002)$ мм.

При оценке неопределенности U_A значений скорости удара, измеренных с использованием двух катушек индуктивности, составляющая по типу А оценивалась через стандартное отклонение серии измерений и составила $U_A = 1,27 \cdot 10^{-3}$ м/с.

Составляющая неопределенности результатов измерений по типу В оценивалась исходя из двух компонент, описывающих отклонения, связанные с инструментальной погрешностью цифрового осциллографа при измерении времени и погрешности определения скорости интерферометром, $\Delta t_0 = 0,1 \cdot 10^{-6}$ с и $\Delta V_0 = 0,0012$ м/с соответственно.

Расширенная неопределенность результатов измерений с коэффициентом охвата $k = 2$ и доверительной вероятностью $P = 0,95$ составила $U_{V_a} = 0,0024$ м/с, что соответствует требованиям для эталонных установок 2-го разряда.

При поэлементной калибровке экспериментального образца эталонной установки 2-го разряда были определены действительные

значения и неопределенность массы ударника, радиуса наконечника ударника и скорости удара.

Неопределенность измерения массы ударника составила $U_m = 0,0160$ г, что соответствует разработанным требованиям для эталонных установок 2-го разряда. Неопределенность измерения радиуса наконечника составила $U_R = 0,003$ мм, что соответствует разработанным требованиям для эталонных установок 2-го разряда. Измеренная интерферометром скорость удара составила $(2,049 \pm 0,0011)$ м/с при временном разрешении 0,19 мс, что соответствует разработанным требованиям для эталонных установок 2-го разряда.

Для исследования показателей повторяемости экспериментального образца эталонной установки 2-го разряда были проведены измерения на комплекте мер твердости 1 разряда по шкале Либса. Калибровка мер была проведена в РТВ (Physikalisch-Technische Bundesanstalt) в соответствии с DIN 50156-3 с помощью первичного эталона HN-01-D. При этом предельная ошибка G_H составила 1,1 %, 0,46 %, 0,6 % на мерах 491,5, 608 и 770 HLD соответственно, что соответствует требованиям к эталонным установкам 2 разряда.

Для обеспечения передачи единицы твердости по шкалам Либса от эталонной установки 2-го разряда рабочим средствам измерений в соответствии с разработанным проектом поверочной схемы была разработана технология и изготовлен комплект мер, которые могут применяться в качестве эталонных мер 2-го разряда. Материалом для изготовления эталонных мер твердости были выбраны стали марок ХВГ (для более твердых мер) и ШХ15 (для мягкой меры). Меры были изготовлены путем предварительной токарно-фрезерной обработки, шлифовки и ручной доводки с применением различных видов и режимов термообработки на каждом из этапов.

Метрологические характеристики изготовленного комплекта мер были определены путем калибровки на разработанном экспериментальном образце эталонной установки 2-го разряда. Номинальные значения мер соответствуют требуемым диапазонам значений твердости. Значения коэффициентов вариации V_H и предельной ошибки G_H не выходят за установленные предельно

допустимые отклонения (Таблица 6). С помощью разработанного комплекта мер были проведены исследования метрологических характеристик рабочих средств измерений (твердомеров) по шкале Либа D, которые подтвердили их соответствие установленным требованиям (Таблица 7).

Вывод: В ходе выполнения экспериментально-расчетной части было установлено соответствие характеристик разработанного экспериментального образца эталонной установки и эталонных мер твердости требованиям к эталонным установкам и мерам 2-го разряда разработанного проекта поверочной схемы. Экспериментально подтверждена возможность передачи единицы твердости по шкалам Либа от первичного эталона до рабочих средств измерений с соблюдением установленных в международных и национальных стандартах метрологических требований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация представляет собой законченную научно - квалификационную работу, в которой предлагается новое решение актуальной научной задачи - повышения точности и достоверности измерений твердости по шкалам Либа в Российской Федерации путем разработки оригинальных технических и методических решений, в частности, прототипа эталонной установки твердости по шкале Либа с применением гравитационного способа разгона ударника и прямого измерения скорости удара, рабочих мер твердости на основе сплава ХВГ и ШХ15 и технологии их поверхностной обработки, а также проекта четырехуровневой иерархической схемы передачи единицы твердости по Либу.

Выполненные исследования позволяют создать аппаратную и методическую базу для реализации метрологической прослеживаемости результатов измерений твердости по шкалам Либа к первичному эталону и обеспечения единства измерений в Российской Федерации. Достижение цели подтверждается успешным прохождением процедуры калибровки твердомеров по шкалам Либа производства ООО «Константа» в соответствии с ISO 16859 в аккредитованных метрологических лабораториях Германии. На основании проведенных исследований получены следующие научные результаты работы:

1. На основании анализа и исследования методов и средств измерений твердости по шкалам Либа была разработана модель процесса измерения твердости по методу Либа, учитывающая влияющие величины.

2. Разработана четырехуровневая структура иерархической схемы передачи единицы твердости по шкале Либа (проект поверочной схемы), обеспечивающая воспроизведение и передачу шкал твердости по Либу от первичного эталона средствами измерений.

3. Сформулирован перечень требований к эталонной установке 2-го разряда и мерам твердости 2-го разряда по шкалам Либа в соответствии с предложенным проектом поверочной схемы и рассчитаны их значения.

4. Разработан прототип эталонной установки твердости по шкалам Либа и комплект мер твердости по шкалам Либа.

5. Разработаны методики оценки неопределенности эталонных установок, мер и рабочих средств измерений твердости по шкалам Либа.

6. Подтверждено соответствие метрологических характеристик разработанной эталонной установки твердости и эталонных мер твердости по Либу требованиям предложенного проекта поверочной схемы и международных стандартов.

Внедрение полученных в ходе диссертационной работы результатов позволит обеспечить потребности промышленности в проверке рабочих средств измерения, а также обеспечить единство и достоверность измерений твердости по шкалам Либа в Российской Федерации. С учетом широкого применения твердомеров по шкалам Либа для оценки состояния ответственного оборудования, предлагаемые мероприятия позволят значительно повысить уровень промышленной безопасности и вероятность безаварийной работы оборудования.

Дальнейшие исследования по данной тематике будут направлены на разработку приборов и методов нового направления в области твердометрии – динамического инструментального индентирования, которое является развитием базовых принципов динамической твердости по шкалам Либа. Внедрение методов динамического инструментального индентирования позволит

расширить перечень измеряемых механических свойств и повысить достоверность и информативность данного вида измерений.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из перечня ВАК:

1. Потапов, А.И. Обеспечение единства измерений твердости динамическим методом в Российской Федерации / А.И. Потапов, В.А. Сясько, К.В. Гоголинский, **А.А. Никазов** // Научно-технический журнал «Контроль. Диагностика» / 2016. -№12, С. 44-50.

2. Сясько, В.А. О развитии динамических методов измерений твердости металлов при продлении срока эксплуатации высокотехнологичного оборудования/ В.А. Сясько, **А.А. Никазов**, А.С. Уманский // «Технологии техносферной безопасности: Интернет-журнал» / 2016. -№6 (70).

3. Сясько, В.А. Разработка эталона твердости по Либу 2-го разряда / В.А. Сясько, **А.А. Никазов** // Обзорно-аналитический, научнотехнический и производственный журнал «Технология Машиностроения» / 2018. -№02, С. 33-38.

Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus:

4. Gogolinskii, K.V. Mechanical properties measurements with portable hardness testers: advantages, limitations, prospects / K.V. Gogolinskii, V.A. Syasko, A.S. Umanskii, **A.A. Nikazov** and T.I. Bobkova // 2019 Journal of Physics Conference Series 1384:012012. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1384/1/012012>.

5. Syasko, V.A. Research and Development of Metrological Assurance Elements for Leeb Hardness Measurements / V.A. Syasko, **A.A. Nikazov** // Inventions – 2021 – Volume 6, Issue 4. <https://doi.org/10.3390/inventions6040086>.

Свидетельство:

6. Свидетельство на программу для ЭВМ. Программа для управления измерителем скорости ударника : №2021668613/69 : заявл. 22.11.2021 : опубл. 30.11.2021 / Сясько В.А., Никазов А.А., Малухин А.Л.; заявитель ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет».

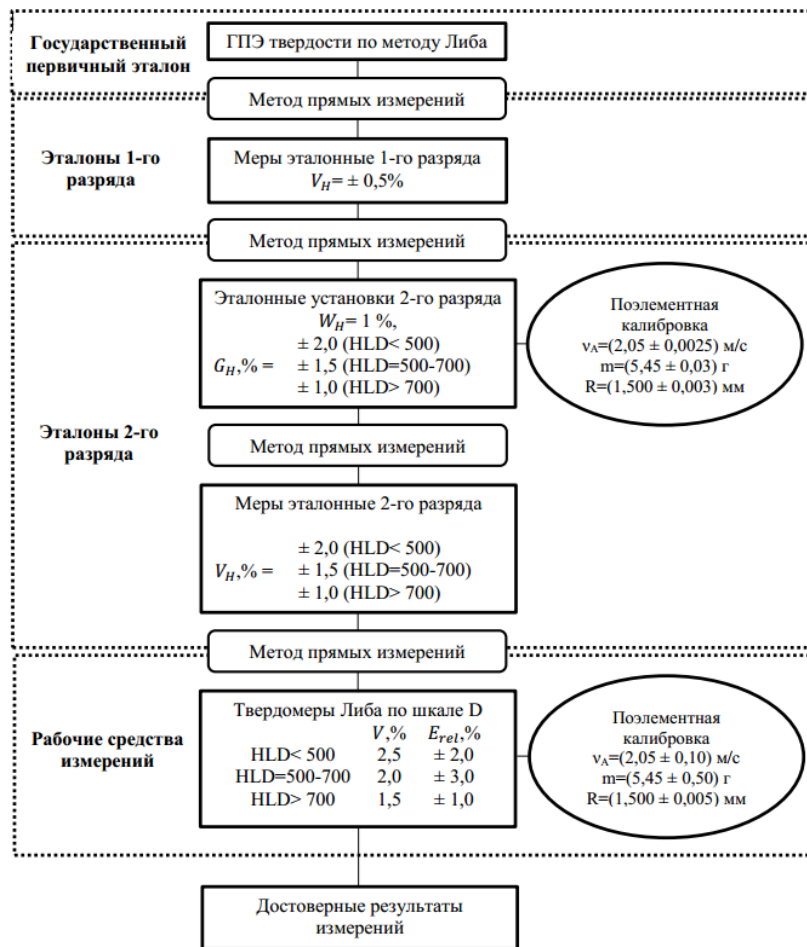


Рисунок 4 – Поверочная схема твердости по Либу, шкала D (проект)

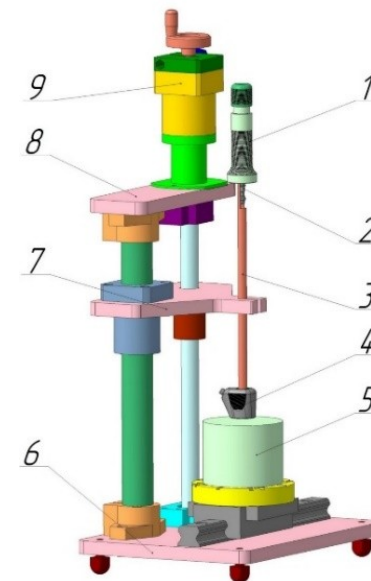


Рисунок 5 – 3D модель экспериментального образца эталонной установки 2-го разряда: 1 – блок удержания и сброса ударника, 2 – ударник, 3 – направляющая трубка, 4 – блок измерения скорости, 5 – испытуемый образец (ИО), 6 – нижняя пластина (основание), 7 – средняя пластина, 8 – верхняя пластина, 9 – блок вращения ШВП.

Таблица 1 – Диапазоны и максимальный коэффициент вариации для эталонных мер твердости 1-го разряда

Диапазоны твердости, HLD	Максимальный коэффициент вариации $V_H, \%$
< 500	$\pm 0,5$
500 - 700	$\pm 0,5$
> 700	$\pm 0,5$

Таблица 2 - Требования к параметрам эталонной установки твердости по Либу 2-го разряда типа D

Параметр	Ед. измерения	Значение
Скорость удара v_A	м/с	$2,05 \pm 0,0025$
Масса ударника m	г	$5,45 \pm 0,03$
Радиус сферического наконечника R	мм	$1,500 \pm 0,003$
Материал наконечника		WC-Co
Твердость наконечника по Виккерсу	HV2	1600 ± 50

Таблица 3 – Диапазоны и максимальный коэффициент вариации для эталонных мер твердости 2-го разряда

Диапазоны твердости, HLD	Максимальный коэффициент вариации V_H , %
< 500	$\pm 2,0$
500 - 700	$\pm 1,5$
> 700	$\pm 1,0$

Таблица 4 – Основные требования для рабочих средств измерений твердости.

Обозначение	Ед. измерения	Наименование	Значение
v_A	м/с	Скорость удара*	$2,05 \pm 0,10$
h	мм	Максимальное расстояние от сферического наконечника до поверхности образца при измерении скорости	2,00
m	г	Масса ударника (включая наконечник)	$5,45 \pm 0,50$

Таблица 5 - Предельные расчетные отклонения и оценка требуемых значений неопределенности параметров эталонной установки.

Параметр	Номинальное значение	Требуемое предельное отклонение	Относит. предельное откл., %
Высота сброса ударника, H_1	214 мм	$\pm 0,1$ мм	0,047
Угол наклона направляющей трубки, $\Delta\varphi$	0°	$0,1^\circ$ для $\Delta v_A = 0,00018$ м/с	
Расстояние между катушками, l	5 мм	± 3 мкм	0,06
Время пролета между катушками Δt	2,425 мс	± 2 мкс	0,08
Ускорение свободного падения g	$9,8155$ м/с ²	$0,024$ м/с ² *	
	$\Delta v_{A\Sigma} = \sqrt{\sum \left(\frac{\Delta v_A}{v_A}\right)^2}$		0,11 %

Таблица 6 – Результаты измерений на мерах твердости 495, 588 и 806 HLD

Твердость образцовой меры твердости, ед.тв.	495	588	806
Среднее значение	496	588	806
СКО	9,1	6,5	6,4
Коэффициент вариации V_H , %	1,83	1,10	0,79
Требуемое значение V_H , %	2	1,5	1
Предельная ошибка G_H , %	1,2	0,29	0,32
Требуемое значение G_H , %	2	1,5	1

Таблица 7 – Результаты измерений на мерах твердости 495, 588 и 806 HLD при помощи твердомера

Твердость образцовой меры твердости, ед.тв.	495	588	806
Среднее значение	495	587	806
СКО	11,5	10,3	11,0
Коэффициент вариации V_H , %	2,32	1,76	1,37
Требуемое значение V_H , %	2,5	2	1,5
Предельная ошибка E_{rel} , %	0,06	0,20	0,04
Требуемое значение E_{rel} , %	4	3	2