

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Санкт-Петербургский горный университет»

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, доцент
Сясько В.А.

Санкт-Петербург – 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

ГЛАВА 1 АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ ТВЕРДОСТИ.....	14
1.1 Твердость, как конструктивное свойство материалов	14
1.2 Физические и методические основы динамических методов измерения твердости	16
1.3 Анализ аппаратной реализации средств динамических методов измерения твердости и их метрологического обеспечения	25
1.4 Постановка задач исследований	35
1.5 Выводы по главе 1	36
ГЛАВА 2 ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ТВЕРДОСТИ ПО ЛИБУ. ОЦЕНКА ВЛИЯЮЩИХ ВЕЛИЧИН	37
2.1 Анализ процесса взаимодействия ударника с испытуемым образцом при измерениях твердости методом упругой отдачи	37
2.2 Теоретический анализ зависимости коэффициента восстановления от параметров измерительного преобразователя и механических свойств испытуемого образца	41
2.3 Анализ влияния параметров измерительного преобразователя на результат измерения твердости по методу Либа	44
2.3.1 Влияние формы индентора на измерение твердости	44
2.3.2 Влияние скорости деформации.....	46
2.3.3 Обобщенная структура средств измерений твердости по шкале Либа	47
2.3.4 Оценка влияния отклонения основных контролируемых параметров твердомеров Либа на результаты измерений	50
2.4 Выводы по главе 2.....	51

ГЛАВА 3 АНАЛИЗ НОРМИРУЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭТАЛОНОВ И СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ ТВЕРДОСТИ ПО ШКАЛАМ ЛИБА. РАЗРАБОТКА СТРУКТУРЫ ИЕРАРХИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ПЕРЕДАЧИ ЕДИНИЦЫ ТВЕРДОСТИ ПО ШКАЛЕ ЛИБА (ПРОЕКТА ПОВЕРОЧНОЙ СХЕМЫ).... 53

3.1 Установление требований в целях обеспечения единства измерений твердости по шкалам Либа	53
3.2 Государственный первичный эталон	55
3.3 Характеристики эталонных мер твердости	55
3.4 Требования к максимальному коэффициенту вариации для мер твердости 1-го разряда для ударных преобразователей типа D	56
3.5 Требования к эталонным установкам 2-го разряда при поверке по эталонным мерам твердости 1-го разряда	56
3.5.1 Предельная ошибка	56
3.5.2 Минимальная повторяемость	57
3.6 Требования к максимальному коэффициенту вариации для мер твердости 2-го разряда для ударных преобразователей типа D	58
3.7 Требования к рабочим средствам измерений	58
3.7.1 Коэффициент вариации	58
3.7.2 Ошибка рабочего средства измерений (твердомера)	59
3.8 Проект поверочной схемы для средств измерений твердости по шкале Либа D	60
3.9 Выводы по главе 3	62

ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА ПРОТОТИПА ЭТАЛОННОЙ УСТАНОВКИ ТВЕРДОСТИ ПО ЛИБУ 2-ГО РАЗРЯДА 64

4.1 Анализ конструктивных решений и применяемых методов измерений для создания прототипа эталонной установки	64
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

4.1.1 Анализ и экспериментальное исследование ударного преобразователя с пружинным механизмом разгона ударника	64
4.1.2 Анализ гравитационного метода разгона ударника	67
4.1.2.1 Оценка влияния высоты сброса	68
4.1.2.2 Оценка влияния угла наклона	68
4.1.2.3 Оценка влияния ускорения свободного падения	69
4.1.3 Анализ методов измерения скорости ударника	70
4.1.4 Анализ системы измерения скорости ударника на основе 2-х катушек индуктивности	73
4.1.4.1 Оценка влияния погрешности измерения расстояния между катушками на измерение скорости	76
4.1.4.2 Оценка необходимой точности измерения времени движения ударника между катушками	77
4.2 Конструкция экспериментального образца эталонной установки 2-го разряда	80
4.2.1 Структурная схема и принципы работы	80
4.2.2 Блок удержания и сброса ударника	82
4.2.3 Расчет поправки значения скорости удара от расстояния до поверхности образца	84
4.3 Выводы по главе 4	86
ГЛАВА 5 ИССЛЕДОВАНИЕ И АНАЛИЗ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РАЗРАБОТАННОГО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОБРАЗЦА ЭТАЛОННОЙ УСТАНОВКИ 2-ГО РАЗРЯДА	87
5.1 Теоретический анализ и экспериментальные исследования технических характеристик экспериментального образца эталонной установки 2-го разряда ..	87
5.1.1 Оценка влияния температуры на высоту сброса	87

5.1.2 Экспериментальные исследования параметров задания и измерения скорости удара	88
5.1.2.1 Исследование метрологических характеристик 2-х катушечного измерителя скорости удара	88
5.1.2.2 Исследование неопределенности значений скорости удара	88
5.1.3 Поэлементная калибровка	91
5.1.3.1 Определение номинального значения и оценка неопределенности массы ударника	91
5.1.3.2 Определение номинального значения и оценка неопределенности радиуса сферического наконечника.....	93
5.1.3.3 Определение номинального значения и оценка неопределенности скорости удара	95
5.2. Исследование метрологических характеристик экспериментального образца эталонной установки на соответствие требованиям к эталонной установке 2-го разряда при калибровке по мерам твердости 1-го разряда.....	97
5.2.1 Выбор эталонных мер твердости 1-го разряда.....	97
5.2.2 Исследование характеристик экспериментального образца эталонной установки 2-го разряда.....	99
5.3 Исследование метрологических характеристик экспериментального образца эталонной установки при передаче единицы твердости эталонным мерам 2-го разряда	100
5.3.1 Технология изготовления мер твердости 2-го разряда	100
5.3.2 Определение метрологических характеристик рабочих мер твердости 2-го разряда при их калибровке на экспериментальном образце эталонной установки 2-го разряда	103
5.4 Выводы по главе 5.....	106
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	107

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	109
ПРИЛОЖЕНИЕ А Калибровочные сертификаты эталонных мер твердости 1-го разряда по шкале Либа D (РТВ).....	119
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Акт внедрения ООО «КОНСТАНТА».....	125
ПРИЛОЖЕНИЕ В Акт внедрения Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет»	126
ПРИЛОЖЕНИЕ Г Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ	127

ВВЕДЕНИЕ

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.

Существующие в данный момент методы измерения твердости были разработаны и введены в использование в двадцатом веке, при этом методики измерений остаются неизменными, модернизируется только испытательное оборудование. Благодаря появлению и развитию новых вычислительных технологий и техники на рынке стали распространяться новые портативные методы измерения твердости, позволяющие производить оперативный безобразцовый контроль характеристик изделий сложной формы, а также производить измерения в труднодоступных местах. Наиболее распространенным портативным методом измерения твердости является метод измерения твердости по шкалам Либа.

Появление новых методов и средств измерений ставит вопрос сравнения результатов измерения твердости со значениями, полученными по шкалам Виккерса, Роквелла и Бриннеля. Данный вопрос особенно остро встает, так как в рабоче-конструкторской документации требуемые значения твердости обычно указаны в шкалах, на которые уже существуют стандарты, и нет никакой возможности связать их с измеренными числами твердости по шкале Либа какими-либо аналитическими зависимостями.

На сегодняшний день в России осуществляют градуировку приборов на отдельных материалах и объектах, которые требуется измерять в пределах одной организации. Данный способ нельзя считать оптимальным или хотя бы приемлемым, так как достоверные результаты могут быть получены только при помощи конкретных моделей приборов на определенных объектах, для которых были изготовлены образцы.

Более перспективным вариантом решения данной проблемы является стандартизация данного метода, что позволит без риска применять различные модели твердомеров (удовлетворяющие требованиям стандарта) с получением одинаковых результатов для всех классов материалов, а также пересчитывать значения твердости из новой шкалы в общепринятые при помощи утвержденных таблиц.

Повсеместное широкое распространение твердомеров по методу 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 [97], D.H. Leeb [84, 85], M. Kompatscher [79, 80], K. Herrmann [72, 73], а также отечественные специалисты: Н.Н. Давиденков [29, 30], Ю.Г. Артемьев [1], В. А. Рудницкий [55-57], Г. А. Крень [40, 41, 56, 57, 81-83, 89], А.В. Федоров [34, 36-38], К.В. Гоголинский [3, 7, 8, 47, 64, 70], В.А. Сясько [7, 8,

47, 61-64, 70, 96]. В настоящее время метрологическое обеспечение измерений твердости по Либу основано на прослеживаемости к первичным эталонам, воспроизводящим основные шкалы данного метода [94]. Такие эталоны имеются, по меньшей мере, в Германии [73] и Китае [99]. 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 [27]. При этом 2 и 3 часть стандарта ISO, посвященные требованиям к твердомерам, мерам твердости и методикам их калибровки в настоящее время отсутствуют. В настоящее время в России разработана эталонная установка твердости по шкалам Либа, утверждённая в статусе Государственного первичного эталона [2]. В существующей поверочной схеме [48] установлены требования только для двух шкал Либа HLD и HLG, что ограничивает потенциал внедрения других стандартизованных шкал Либа.

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

Задачи исследований:

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.

Объект, предмет исследования. 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 Государственной поверочной схемы шкал твердости Либа по ГОСТ Р 8.969-2019 (ISO 16859-1:2015) «ГСИ. Металлы и сплавы. Определение твердости по шкалам Либа. Часть 1. Метод измерений» данную установку планируется аттестовать и использовать в качестве эталонной установки 2-го разряда.

Методология и методы исследований. 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.

Положения, выносимые на защиту:

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. Результаты работы также использованы при разработке учебных курсов по программам академического бакалавриата и магистратуры на Кафедре метрологии, приборостроения и управления качеством Санкт-Петербургского Горного университета.

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. Саратов, 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

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 диссертации

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.

ГЛАВА 1 АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ ТВЕРДОСТИ

1.1 Твердость, как конструктивное свойство материалов

Механические свойства материалов - реакция материала на приложенные механические нагрузки. Под воздействием приложенной силы тело изменяет свою форму, т.е. деформируется. При деформациях твердого тела его частицы (атомы, молекулы, ионы), находящиеся в узлах кристаллической решетки, смещаются из своих положений равновесия. Этому смещению противодействуют силы взаимодействия между частицами твердого тела, удерживающие эти частицы на определенном расстоянии друг от друга. Поэтому при любом виде деформации в теле возникают внутренние силы, препятствующие его деформации. С точки зрения механических свойств изделие характеризуется значением деформации, возникающей в ответ на приложенную силу, а материал – относительной деформацией на единицу длины под воздействием удельной силы на единицу площади, называемой напряжением. Относительная деформация – безразмерная величина, определяемая как отношение удлинения (сжатия) к исходному размеру образца. Напряжение - это сила, приложенная к единице площади сечения образца материала или изделия. В СИ за единицу механического напряжения принимают $1\text{Па} = 1\text{Н}/\text{м}^2$. Основной характеристикой механических свойств материала являются соотношение между напряжением и деформацией (рисунок 1). Деформации принято разделять на упругие, если после прекращения действия силы, форма и объем тела полностью восстанавливаются, пластические, которые развиваются постепенно и не исчезают после прекращения действия силы. Различают основные типы деформации: растяжения и сжатия (одностороннего и всестороннего), изгиба, кручения и сдвига. Если в процессе деформирования тела происходит превышение предельного значения напряжения, называемого пределом прочности, происходит разрушение образца. В зависимости от степени пластической деформации перед разрушением различают два основных вида разрушений: хрупкое и вязкое. При вязком

разрушении материал претерпевает перед разрушением не только упругую, но и значительную пластическую деформацию. При отсутствии пластической деформации или при ее незначительном развитии происходит хрупкое разрушение [5].

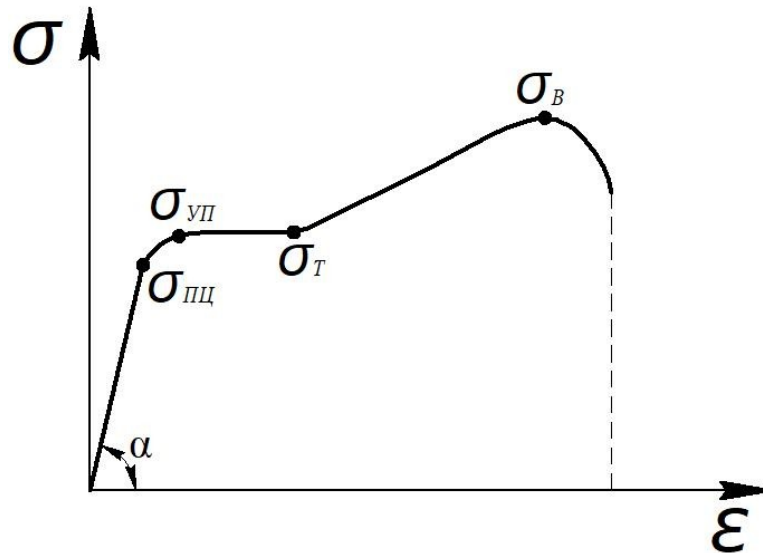


Рисунок 1 – Кривая напряжение-деформация: $\sigma_{\text{ПЦ}}$ – предел пропорциональности, $\sigma_{\text{УП}}$ – предел упругости, $\sigma_{\text{Т}}$ – предел текучести, $\sigma_{\text{В}}$ – предел прочности [5].

Твердость является одной из основных характеристик материалов и представляет собой обобщенную характеристику упруго-пластических свойств материалов [5]. Измерения твердости широко распространены в промышленности как при выборе технологии и режимов обработки материалов, так и для оценки технического состояния изделий при их изготовлении и последующей эксплуатации. Твердость чаще всего определяют как способность материала сопротивляться внедрению в него более твердого тела (индентора). При внедрении индентора в испытуемый материал в приповерхностной области возникают механические напряжения, которые зависят от прикладываемого усилия, формы индентора и параметров цикла нагружения [33]. В зависимости от величины этих напряжений в поверхностном слое металла происходят упругие, упруго-пластические или пластические деформации. По величине этих

деформаций на поверхность испытуемого образца определяют значения твердости.

1.2 Физические и методические основы динамических методов измерения твердости

В соответствии с положениями, сформулированными Давиденковым Н.Н., механические характеристики материалов можно условно разделить на основные (первичные) и производные (вторичные) [30]: «Первые взаимно независимы, вторые являются только функциями первых. К первым принадлежат: пределы упругости и текучести, временное сопротивление (предел прочности), удлинение и сужение, функция упрочнения (т. е. зависимость сопротивления деформированию от величины деформации при линейном напряженном состоянии), функция зависимости упрочнения от скорости, предел усталости и многие другие. Во второй группе мы встречаем характеристики двух видов: такие, для которых связь их с характеристиками первой группы вскрыта до конца и такие, для которых эта связь несомненно существует, но еще не может быть безошибочно установлена при современном состоянии наших знаний: ударная вязкость и, конечно, твердость всех видов». Несмотря на значительные достижения в области физики и механики материалов приведенное утверждение не потеряло своей актуальности.

Твердость – комплексный параметр, связанный с «первичными» характеристиками материалов, но зависящий от метода, с помощью которого производят испытания [32]. На «бытовом» уровне величина твердости определяется через взаимное сравнение разных материалов. Переход от качественных (относительных) испытаний на твердость к измерениям значений твердости происходит при стандартизации шкалы твердости, которая подразумевает утверждение методики измерений, конструкции измерительного оборудования, требований к условиям испытаний, способов выражения чисел, в которых измеряется твердость, средств и методов передачи чисел твердости (обеспечения прослеживаемости). Шкалы твердости являются шкалами порядка,

поэтому результаты полученные результаты измерений подвергаются только операциям сравнения и выражаются в безразмерных величинах – числах твердости [33].

Методы испытания на твердость можно классифицировать следующим образом (рисунок 2) [46, 47].

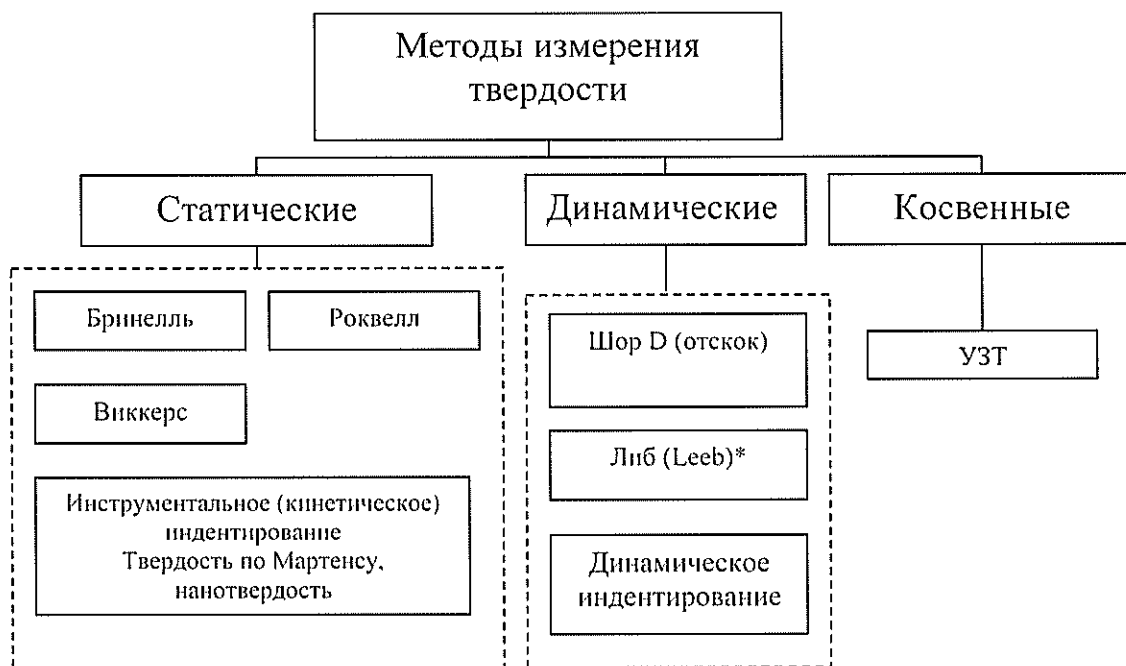


Рисунок 2 – Классификация методов измерения твердости [46, 47]

Статическая твердость характеризуется скоростью внедрения индентора $< 0,1$ м/с. Значения твердости определяются путем прямого измерения геометрических размеров отпечатков (шкалы Бринелля, Виккерса, Кнуппа), либо по глубине внедрения индентора (шкалы Роквелла, Инструментального-indentирования) [10-25]. Значения твердости (числа твердости) определяются по соотношению приложенной нагрузки и геометрических размеров отпечатка.

Мейер показал, что при статическом вдавливании шарика между вдавливающей силой P и диаметром отпечатка d существует зависимость (1) (за пределом упругости)

$$P = ad^n, \quad (1)$$

где a и n — две постоянные, характеризующие материал: a зависит от диаметра шарика, n наоборот, не зависит, но изменяется для одного и того же материала вместе с наклепом; обычно n заключается между 2 и 2,5.

Физический смысл статической твердости: сопротивление материала пластической деформации при медленном (квазистатическом) внедрении более твердого индентора. В соответствии с классификацией Давиденкова статическая твердость, как вторичная характеристика материала, является функцией (2) следующих первичных характеристик материала: предела текучести, предела прочности, коэффициента деформационного упрочнения.

$$H = f(\sigma_T, \sigma_B, n), \quad (2)$$

где σ_T — предел текучести, σ_B — предел прочности (временного сопротивления), n — показатель деформационного упрочнения из уравнения Мейера (1).

Влияние модуля упругости на величину измеренных значений твердости считается пренебрежимо малым для таких пластичных материалов, как металлы, при значительных степенях деформирования, которые имеют место для большинства методов измерения твердости.

Разные статические шкалы твердости различаются формой индентора, диапазоном прикладываемой нагрузки, способом выражения чисел твердости в зависимости от измеряемых величин. Различие геометрии индентора приводит к разной степени деформирования и, как следствие, деформационного упрочнения материала, что особенно характерно для металлов, обладающих большой степенью деформационного упрочнения. С этой точки зрения необходимо различать самоподобные инденторы, которые обеспечивают идентичное (подобное) поле деформаций при разных глубинах внедрения (пирамиды Виккерса, Кнуппа, Берковича), и инденторы, не обеспечивающие закона подобия (шарик Бринелля, конус Роквелла). Данный вопрос подробно рассмотрен Григоровичем в работе [28]. Для самоподобных инденторов можно ожидать равенства значений твердости при разных нагрузках/глубинах индентирования. В случае несамоподобных инденторов такое равенство невозможно из-за разной

степени деформации и деформационного упрочнения. Однако даже для самоподобных инденторов значения твердости при разных нагрузках могут меняться из-за неоднородности механических свойств материала по глубине, например, вследствие механического воздействия на поверхность при обработке. Поэтому при обозначении измеренных значений твердости в обязательном порядке указывают наименование шкалы и приложенную нагрузку. Все перечисленные различия шкал твердости приводят к тому, что не существует универсальных для всех материалов способов пересчета одних шкал статической твердости в другие. Физически это означает, что разные материалы по-разному сопротивляются пластической деформации при внедрении инденторов с разной геометрией и на разную глубину.

В соответствии с классификацией, предложенной Н.Н. Давиденковым [29] динамические способы измерения твердости могут быть разделены на три основные группы:

- а) *метод отпечатка*, даваемого шариком (или ударником с шариком на конце) на поверхности образца при ударе вместо статического нажатия;
- б) *метод упругой отдачи* при ударе по испытуемому объекту стального шарика или специального бойка;
- в) *метод качания* стального или алмазного шарика, соединенного с определенной массой (маятник), в гнезде произведенного им отпечатка.

В настоящее время методы качания маятника слабо распространены в промышленности, поэтому в дальнейшем будем анализировать методы отпечатка и метод упругой отдачи (Григорович предложил деление на динамическую и упругую твердость).

Метод отпечатка весьма близок к статическим методам. В соответствии положениями, изложенными в работе Д.Б. Гогоберидзе [6] методы, в которых твердость характеризуется величиной восстановленного отпечатка, даваемого стандартным ударником в испытуемом материале, являются переходными от статических методов измерения твердости к чисто динамическим. Результаты измерений, полученные данными динамическими методами, аналогичны

статическим. Твердость в этих методах пропорциональна величине пластической деформации, поэтому малейшее изменение скорости удара приводит к существенной погрешности результатов измерений. В той же работе [6] приведены данные о том, что постоянные уравнения Мейера a и n , а следовательно, и твердость металла зависят от скорости удара индентора по испытываемой поверхности. При увеличении скорости испытания до величин, используемых в динамических методах, n уменьшается и становится постоянным и равным минимально возможному значению этой величины, наблюдаемой при статических испытаниях. Это можно объяснить влиянием объемов металла, вовлекаемых в пластическую деформацию при ударном и статическом нагружениях: при ударе область (объем металла) деформации меньше, но деформация сильнее, чем в аналогичном случае при статическом нагружении. Если степень деформации в этом меньшем объеме металла выше при динамическом нагружении, чем при статическом, то и n должно быть в этом случае меньше.

Метод упругой отдачи. Существует особая группа методов определения динамической твердости (методы Шора, Либа и др.), где единственным измеряемым параметром является высота или скорость отскока ударника, снабженного жестким сферическим наконечником (индентором). За меру твердости здесь принимается высота отскока или скорость отскока в условных единицах.

При соударении двух тел происходит деформация в области контакта индентора с поверхностью, что ведет к образованию остаточного отпечатка. На пластическую деформацию тратится часть энергии удара, оставшаяся энергия тратится на упругую деформацию, возвращается к ударнику и поднимает его на высоту H_2 . Так как высота падения H_1 и масса ударника m постоянны, то высота отскока H_2 характеризует энергию упругого последствия или восстановления отпечатка. Если выразить упругую твердость в единицах высоты отскока или в условных единицах длины, что в скрытой форме заключает размерность потенциальной энергии ($H^* \cdot \text{мм}$), то сравнивать ее с динамической или статической

твердостью будет трудно. В методе Шора упругая твердость выражена в виде отношения H_2/H_1 .

Следует отметить, что динамическая и упругая твердости не могут находиться в простом соотношении, так как динамическая твердость представляет прежде всего удельную работу пластического деформирования материала внедряющимся индентором, а упругая твердость характеризует удельную работу упругого восстановления отпечатка и определяется главным образом упругими характеристиками материала.

При измерении твердости статическими методами, например, по Бринеллю, Виккерсу или Роквеллу, приложение нагрузки происходит очень медленно (от 5 до 15 с), то есть почти статично. Статическая твердость в основном относится к пластическим свойствам, соответственно скорость деформации, как правило, равна порядка $10^{-5}/\text{с}$. Тем не менее, как известно из литературы по высокоскоростной деформации [78, 95], пластические свойства материалов сильно зависят от скорости деформации для подавляющего большинства материалов. Другими словами, предел текучести металлов установленный при высоких скоростях деформации (около $10^3/\text{с}$ при высокоскоростных процессах обработки) значительно увеличивается по сравнению с деформацией при квазистатических скоростях.

В зависимости от измеряемых величин, например, энергии удара, скорости удара, ударного импульса, время контакта, энергии деформации, размера отпечатка, энергии отскока и т.д., может быть получено выражение для динамической твердости. Первое определение динамической твердости H_d , согласно Мартелю [88], представлено в виде выражения (3):

$$H_d = \frac{mv_A^2}{2V} \left[\frac{\text{Н}}{\text{М}^2} \right], \quad (3)$$

где v_A - скорость соударения с образцом нормируемого ударника с заданной массой m , а V - невосстановленный объем отпечатка, измеренный на образце. Так же, как и для статических измерений, это выражение (3) имеет размерность давления. Таким образом, это снова измерение сопротивления материала (анти-

давление) внешнему давлению.

Д. Табор выдвинул обширную теорию [97]. Он отметил, что в расчет также необходимо принимать энергию отскока. На самом деле, если рассматривать только остаточную деформацию, то и должен быть измерен только отпечаток, оставшейся после отскока (после упругого восстановления образца). Другое сомнительное предположение состоит в том, что сопротивление индентированию является постоянным в течение всего процесса деформирования, так как на практике все различные этапы в процессе взаимодействия индентора и образца, влияют на результат:

Этап 1: поверхность упруго деформируется. Если воздействие достаточно невелико, поверхность упруго восстановится и отскок ударника произойдет без остаточной деформации. Взаимодействие в этом случае является абсолютно упругим и может быть смоделировано в соответствии с уравнениями Герца для упругих взаимодействий.

Этап 2: если соударение таково, что предел упругости (предел текучести) металла превышен, то появится пластическая деформация и взаимодействие больше не будет абсолютно упругим. Пластическая деформация начинает происходить уже при экстремально малой энергии удара и с увеличением энергии удара быстро переходит в состояние абсолютной пластичности.

Этап 3: при более высокой энергии удара происходит полномасштабная пластическая деформация, пока не будет поглощена вся кинетическая энергия ударника.

Этап 4: наконец, в результате высвобождения упругих напряжений ударника происходит отскок.

По сравнению с статическим вдавливанием, продолжительность приложения нагрузки при динамических измерениях твердости зависит от фрикционных свойств и коэффициента восстановления (который сам по себе зависит от скорости соударения) образца и индентора.

Все динамические твердомеры имеют одну общую черту, а именно портативность, что позволяет легко переносить их к месту тестирования.

Измерения можно проводить на большегрузных объектах, объектах уже внедренных в работу заводов или на деталях машин без их демонтажа.

Существует два типа динамических твердомеров: 1) при котором размер отпечатка измеряется оптическими методами, как в методе Бринелля; 2) в котором оценивается упругая реакция материала по параметрам отскока ударника.

Первая группа тестеров - компараторы, как Польди-молот, Теле-Бринелль, Бауман-Штейнрюк-Молот и тестер Shear Pin [84]. Все они оптически измеряют размер отпечатка после динамического воздействия. Полученные результаты напрямую связывают с требуемым значением статической твердости, обычно это твердость по Бринеллю. Благодаря небольшой стоимости, некоторые из этих твердомеров используются до сих пор. Конечно, точность и зависимость от пользователя являются значительным недостатком и корреляции в основном базируются на предположениях из статических измерений, строго говоря, не действующих в динамических условиях испытаний. Развитие технологий фактически помогло заместить этот тип твердомеров.

Вторая группа тестеров фактически измеряет отскок ударника с индентором. Первым инструментом данного типа является так называемый Склероскоп Шора, изобретенный в 1907 году Альбертом Ф. Шором. Ударник с алмазным наконечником сбрасывается с определенной высоты на поверхность испытуемого материала. Высота отскока является мерой твердости металла.

Согласно стандарту ASTM E 448 [66] используются две модели прибора: модель С и модель D. Различаются эти два твердомера ударниками (форма и масса) и высотой падения. Шкала твердости склероскопов Шора состоит из чисел, определенных путем деления на 100 средней высоты отскока ударника от конкретного исследуемого материала. Таким образом шкала твердости по Шору определяется материалом, использованным для калибровки (эталон) и моделью твердомера.

Необходимо соблюдать осторожность, чтобы не перепутать разные шкалы, например, HFRSC-HSC и HSC-HSD. Кроме того, использование различных

ударников для одной модели твердомера может привести к нежелательным результатам. Так же, как для всех других методов испытаний твердости измерения должны осуществляться перпендикулярно к исследуемой поверхности. В случае твердомеров по Шору, где для ускорения ударника используется только гравитация, работа возможна только в вертикальном положении.

В начале 1970-х Дитмар Либ изучал различные методы измерения твердости, делая акцент на портативные устройства, например, основанные на методах Баумана-Штейнрюка, Шмидта и Шора [85]. Наиболее часто используемыми портативными твердомерами были твердомеры динамического типа, где нагрузка приложена импульсно. Возник вопрос, как можно без потери точности увеличить диапазон измерений и расширить рамки применения прибора, например, независимость от направления тестирования, ускорение работы, комфорт для пользователей.

Итогом работы Либ стало изобретение нового динамического метода и разработка прибора в 1975 году в сотрудничестве с компанией EQUOTIP.

Суть метода заключается в измерении соотношения скоростей v_i падающего ударника до и после соударения с поверхностью испытуемого образца (рисунок 3). Твердость по Либу HL рассчитывается в соответствии с формулой (4):

$$HL = 1000 \frac{v_R}{v_A} \quad (4)$$

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

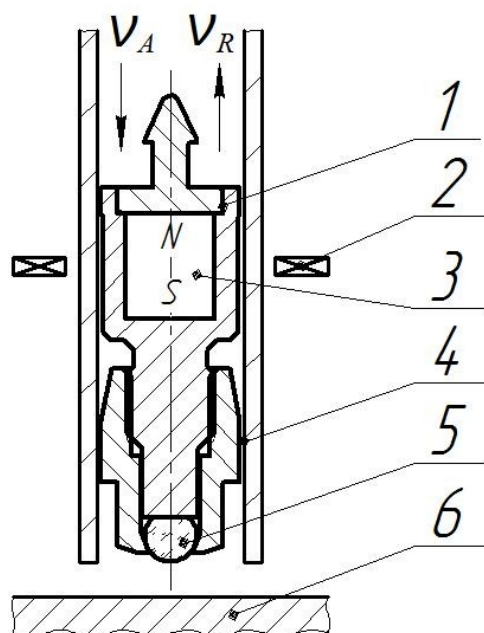


Рисунок 3 – Схема измерения твердости по Либу: 1 – корпус ударника, 2 – катушка индуктивности, 3 – постоянный магнит (N-северный полюс, S-южный полюс), 4 – направляющая трубка; 5 – сферический наконечник (индентор); 6 – испытуемый образец

Главная идея Либя 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 прямо пропорциональна скорости магнита, установленного внутри ударника. Сигнал наведенной ЭДС записывается в электронном блоке с индикатором, и пиковые значения индуктированного напряжения используются для получения чисел твердости Либя HL. Форма сигнала наведенной ЭДС уникальна для каждого типа твердомера.

1.3 Анализ аппаратной реализации средств динамических методов измерения твердости и их метрологического обеспечения

Согласно Европейским стандартам ISO 16859(1-3) [75-77] твердомер, используемый для измерения твердости по Либу, состоит из ударного преобразователя и электронного измерительного блока, определяющего скорости удара и отскока ударника.

В таблице 1 приводятся определения, обозначения и параметры шкал Либа в зависимости от типа ударного преобразователя. Число твердости Либа обозначается символом "HL" с добавлением одной или нескольких букв, обозначающих тип ударного преобразователя, например, 570 HLD значит, что твердость по шкале Либа (HL) была измерена с использованием ударного преобразователя типа D, ударник которого падал в направлении действия силы тяжести.

Таблица 1 – Определения, обозначения и параметры шкалы Либа в зависимости от типа ударного преобразователя

Обозначение	Ед. измерения	Определение	Параметры типов ударных преобразователей						
			D ¹⁾	S	E	DL	D+15	C	G
E_A	мДж	Кинетическая энергия удара ²⁾	11,50	11,40	11,50	11,95	11,20	3,00	90,00
V_A	м/с	Скорость удара	2,05	2,05	2,05	1,82	1,70	1,40	3,00
V_R	м/с	Скорость отскока	0,6150 - 1,8245	0,8200 - 1,8860	0,6150 - 1,8860	1,1092 - 1,7290	0,5610 - 1,5130	0,4900 - 1,3440	0,9000 - 2,2500
h	мм	Максимальное расстояние от сферического наконечника до поверхности образца при измерении скорости	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	3,00
M	г	Масса ударника	5,45	5,40	5,45	7,25	7,75	3,10	20,00
R	мм	Радиус сферического наконечника	1,50	1,50	1,50	1,39	1,50	1,50	2,50
		Материал сферического наконечника	WC-Co ³⁾	C ⁴⁾	PCD ⁵⁾	WC-Co ³⁾	WC-Co ³⁾	WC-Co ³⁾	WC-Co ³⁾
HL		Твердость по Либу	HLD	HLS	HLE	HLDL	HLD+15	HLC	HLG

Продолжение таблицы 1

Обозначение	Ед. измерения	Определение	Параметры типов ударных преобразователей						
			D ¹⁾	S	E	DL	D+15	C	G
		Диапазон измерений	300 HLD	400 HLS	300 HLE	560 HLDL	330 HLD+15	300 HLC	300 HLG
			-	-	-	-	-	-	-
			890 HLD	920 HLS	920 HLE	950 HLDL	890 HLD+15	960 HLC	750 HLG
<p>1) Имеет альтернативное исполнение, обозначаемое «DC».</p> <p>2) Ударяет вертикально вниз, в направлении действия силы тяжести, округленно.</p> <p>3) Вольфрам - карбид кобальта.</p> <p>4) Керамика.</p> <p>5) Поликристаллический алмаз.</p>									

В состав ударного преобразователя (рисунок 4) входит ударник (рисунок 3), состоящий из сферического наконечника и корпуса, в который встроен постоянный магнит (параметры ударников приведены в таблице 1).

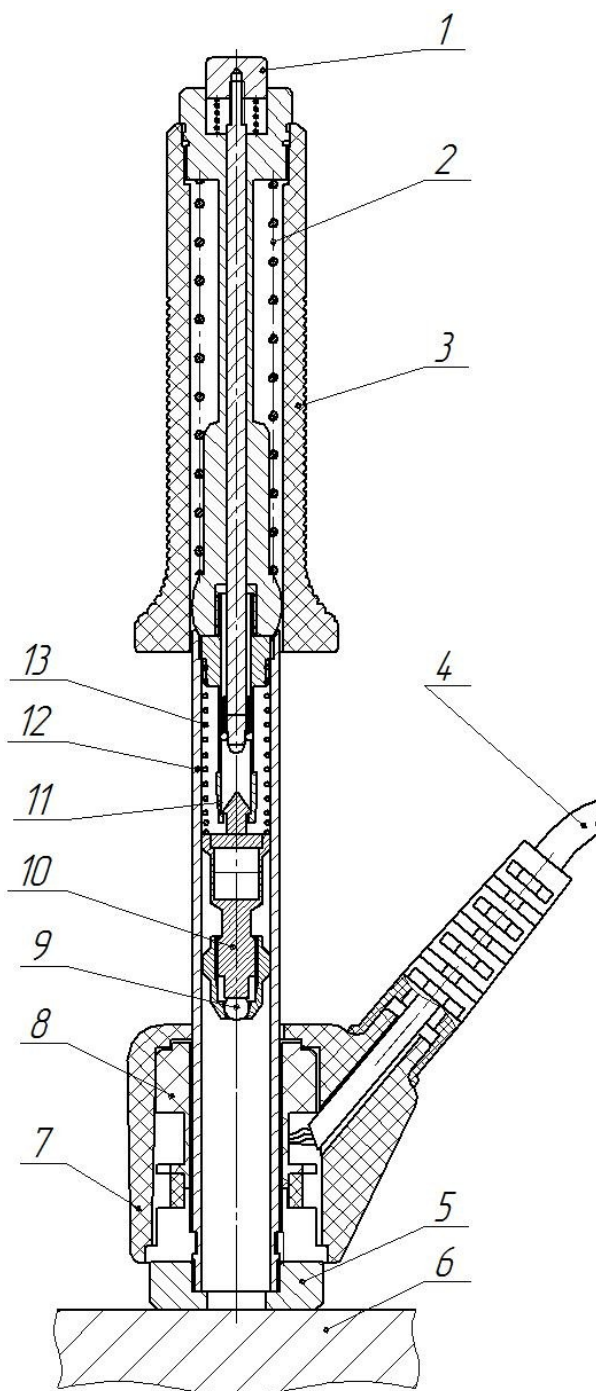


Рисунок 4 – Схематическое изображение ударного преобразователя (Тип D) перед ударом (ударная пружина взведена): 1 - кнопка спуска; 2 - взводящая пружина; 3 – взводящая трубка; 4 – соединительный кабель; 5 – опорное кольцо; 6 – испытуемый образец; 7 - корпус катушки индуктивности; 8 – катушка индуктивности; 9 – сферический наконечник (индентор); 10 – ударник; 11 – цанга; 12 - направляющая трубка; 13 - ударная пружина

Рассмотрим принцип действия ударного преобразователя типа D (рисунок 5). На нижней части ударного преобразователя должно быть плотно закреплено

опорное кольцо. Опорная поверхность должна быть сконструирована таким образом, чтобы предотвратить смещение ударного преобразователя во время измерения. Процедура измерения состоит в следующем: Необходимо установить преобразователь на испытуемый образец нормально к поверхности и прижать его торцевой плоскостью к поверхности не допуская покачивания. Взвести пружинный механизм преобразователя в рабочее положение, сдвинув взводящую трубку вниз до щелчка, свидетельствующего о захвате ударника цангой. Плавно вернуть взводящую трубку, не допуская ударов и срыва ударника. Убедиться в устойчивости преобразователя на поверхности испытуемого образца и нажать кнопку спуска преобразователя, при этом ударник освободится от захвата цанги и под действием взведенной ранее ударной пружины совершит удар по поверхности испытуемого образца.



Рисунок 5 – Проведение измерений ударным преобразователем типа D

Ударник, пролетая сквозь катушку индуктивности, наводит в ней ЭДС, амплитуды E_A и E_R импульсов которой пропорциональны v_A и v_R (рисунок 6). Катушка располагается на трубке таким образом, чтобы в момент измерения скорости расстояние от сферического наконечника до поверхности испытуемого образца составляло не более 2 мм.

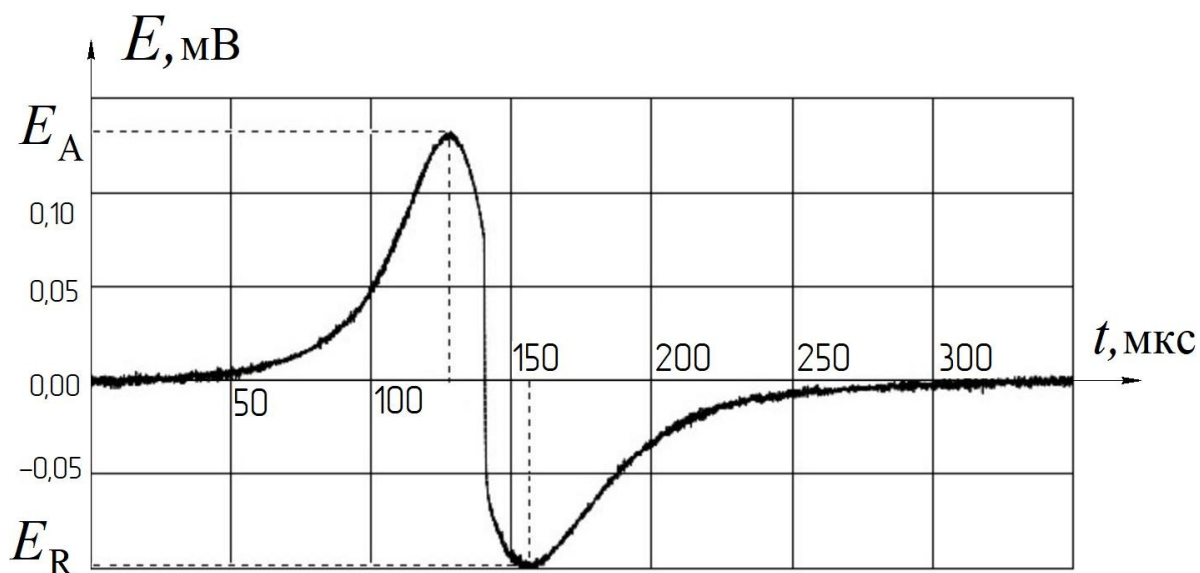


Рисунок 6 – Диаграмма ЭДС $E(t)$, наведенной на катушке индуктивности при измерении твердости

Существующие варианты исполнения ударных преобразователей представлены на рисунках 7 и 8, для примера взяты преобразователи из линейки EQUOTIP Швейцарского производителя Proseq [90] и преобразователи отечественного производителя Константа соответственно [39].



Рисунок 7 – Общий вид ударных преобразователей для динамических твердомеров из линейки EQUOTIP (производство Proseq SA, Швейцария) [90]



Рисунок 8 – Общий вид ударных преобразователей Константа [39]

Малые габариты, эргономичность и скорость произведения контроля стали основными факторами, обеспечившими популярность и широкое распространение динамических твердомеров [36, 37, 38, 69, 86, 101]. Широкое использование динамических твердомеров ставит вопрос сравнения результатов, полученных динамическими и статическими методами измерения твердости [57]. Усложняет проблему отсутствие стандартов на методы, что ведет к различиям в конструкциях и параметрах преобразователей. При этом для большинства изделий при наличии требований на твердость изделия, требуемые значения указываются в стандартизованных статических шкалах, и, как было сказано выше, числа твердости разных шкал не связаны друг с другом математическими зависимостями [70].

Числа твердости НЛ являются первичными при измерениях методом Либа. В стандартах рассматриваются вопросы соответствия значений НЛх другим шкалам твердости. В частности, в ISO 16859-1 п.10 [75] говорится: «Не существует общей процедуры для точного преобразования шкалы твердости Либа в другие шкалы твердости Либа или иные шкалы твердости (не Либа)...» Таких преобразований, следует избегать, если не получено надежное обоснование для преобразований из одной шкалы в другую с помощью сравнительных тестов».

В настоящее время метрологическое обеспечение измерений твердости по Либу основано на прослеживаемости к первичным эталонам, воспроизводящим основные шкалы данного метода [94]. Такие эталоны имеются, по меньшей мере,

в Германии [73] и Китае [99]. Передача шкал твердости рабочим средствам измерений обеспечивается мерами, разработанными специально для метода Лейба.

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). При этом происходит подмена понятий, т.к. поверка проводится по мерам твердости соответствующих шкал для статических твердомеров. По сути, имеет место градуировка шкалы прибора путем подгонки нужных коэффициентов пересчета таким образом, чтобы его показания соответствовали значениям измеряемых мер. В то же время, если таким прибором провести измерения мер той же шкалы, но из другого материала, то он выдаст неверные значения. В результате, прибор дает правильные результаты измерений только на материалах, аналогичных тем, из которых изготовлены меры, на которых он был поверен. При этом в описаниях типа, свидетельствах о поверке и руководствах по эксплуатации таких приборов не удалось найти ограничений их применимости для разных типов материалов. Таким образом, пользователи приборов вводятся в заблуждение относительно возможностей их использования и метрологических характеристик [44]. Данный факт представляется весьма опасным, учитывая количество продаваемых в РФ приборов такого типа и отрасли, в которых они используются. В Госреестр средств измерений на сегодняшний день внесено более 2-х десятков твердомеров, обозначенных как «динамические», «портативные», «малогабаритные» или «переносные» [62].

В качестве примеров использования сертифицированных динамических твердомеров, как средств измерений по другим шкалам твердости, можно привести отраслевые нормативные документы:

1. Инструкция Росэнергоатома: И 1.2.1.02.019.1121 [35]. В приведенном документе в п. 6.3.2 прямо сказано: «Средства измерений, основанные на методе Лейба, используют для определения твердости по шкале Бринелля, Виккерса или Роквелла».

2. Руководящий документ ОАО РЖД РД 32 ЦВ 050-2005 [53]. В этом документе в п. 4.1.6.3. дана ссылка на применение динамического твердомера МЕТ-Д1 для измерения твердости по Виккерсу: «Контроль твердости наплавки износостойких поверхностей. Контроль твердости наплавки износостойких поверхностей 240 - 300НВ проводить твердомером портативным динамическим типа МЕТ-Д1, зарегистрирован в Госреестре средств измерений № 22736-02».

3. Инструкция Федеральной службы по экологическому и атомному надзору СО 153-34.17.440-2003 [59] в приложении Р п. 1.5 сказано: «При использовании переносных приборов с относительно неглубоким внедрением шарика (менее 0,2 мм), например, типа ТЭМП-1, рекомендуется следующее число измерений».

4. Методические указания по проведению экспертизы промышленной безопасности ОАО «Сургутнефтегаз» МУ 21У-003-2004 [43] в пункте 5.13 Твердометрия сказано «Механические характеристики могут быть определены косвенными методами после измерения твердости с помощью ударных переносных твердомеров ВПИ-3МБ (ТБД-1) для определения твердости стальных изделий в единицах Бринелля НВ. Для определения твердости стальных изделий по Виккерсу НРС используются приборы... ТДМ-1, ТЕМП-2 и др., отвечающие требованиям ГОСТ 22761 и ГОСТ 22762».

А также многие другие [45, 49, 50, 52, 54, 58, 60].

В соответствии с [76] числа твердости НЛ являются первичными при измерениях методом Либа. Также твердомеры по Либу имеют возможность пересчета в наиболее часто используемые шкалы твердости по стандартизованным в Европе и США таблицам соответствия для наиболее распространенных групп материалов, в частности для различных типов сталей, медных сплавов, бронз, алюминиевых сплавов и т.д. [87].

Требования и ограничения к использованию таблиц пересчета регламентированы международными стандартами [65, 74, 92].

Негативные последствия сложившейся в РФ практики поверки твердомеров Либа по мерам других шкал твердости проявляются также в том, что отечественные «динамические» твердомеры, успешно прошедшие поверку в РФ,

не могут применяться за рубежом, в частности в Европе. Причиной этого является отличие параметров преобразователей и градуировка приборов по статическим мерам твердости.

Из всего вышеперечисленного следует, что твердомер, который по своей конструкции, методу измерений, форме индентора, алгоритму расчета значений твердости и другим существенным параметрам не соответствует стандарту на данную шкалу твердости, не может быть поверен по этой шкале в рамках существующих поверочных схем. Таким образом сложившаяся в РФ практика использования динамических твердомеров для контроля состояния изделий из сталей и сплавов при продлении срока эксплуатации высокотехнологичного оборудования может стать причиной выхода его из строя и возникновения аварийных ситуаций.

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 [27]. При этом 2 и 3 часть стандарта ISO, посвященные требованиям к твердомерам, мерам твердости и методикам их калибровки в настоящее время даже не включены в Программу национальной стандартизации. Во ФГУП ВНИИФТРИ на базе установки, изготовленной фирмой PROCEQ, была разработана эталонная установка твердости по шкалам Либа, утверждённая в статусе Государственного первичного эталона [2]. В существующей поверочной схеме [48] установлены требования только для двух шкал Либа HLD и HLG, что ограничивает потенциал внедрения других стандартизованных шкал Либа. Критической проблемой является внедрение трехступенчатой 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 привело к прекращению практики испытаний и поверки динамических твердомеров как средств измерения по статическим шкалам твердости [96]. 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.

1.4 Постановка задач исследований

Выполненный анализ задачи измерения твердости по методу Либа и его метрологического обеспечения в РФ позволяет поставить цели и задачи диссертационной работы.

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

Задачи исследования. Для достижения обозначенной цели в диссертационной работе необходимо решить следующие задачи:

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.

1.5 Выводы по главе 1

1. Произведен анализ существующих статических и динамических методов измерения твердости. Рассмотрены физические и методические основы динамических методов измерения твердости;

2. Рассмотрены особенности аппаратной реализации метода Либа и требования к основным метрологическим характеристикам преобразователей;

3. Произведен анализ текущего состояния метрологического обеспечения измерения твердости по шкалам Либа в Российской Федерации, который позволил поставить цели и задачи диссертационной работы.

ГЛАВА 2 ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ТВЕРДОСТИ ПО ЛИБУ. ОЦЕНКА ВЛИЯЮЩИХ ВЕЛИЧИН

2.1 Анализ процесса взаимодействия ударника с испытуемым образцом при измерениях твердости методом упругой отдачи

В ходе измерения твердости по методу Либа ударник массой m разгоняется до скорости удара v_A с поверхностью материала при свободном или ускоренном движении. В ходе взаимодействия шарового наконечника (индентора) ударника с испытуемым образцом происходит деформация поверхности образца под индентором, пока не будет поглощена вся кинетическая энергия ударника. Наконец в результате высвобождения упругих напряжений происходит отскок ударника. При этом процесс соударения ударника с поверхностью материала во времени t описывается уравнением (5):

$$\frac{d^2S}{dt^2} = \frac{dv}{dt} = -\frac{1}{m_M} P(t) = -a(t), \quad (5)$$

где v — текущая скорость внедрения; S — характеристика линейного перемещения ударника (глубина деформирования материала); m_M — масса материала ($m \ll m_M$); P — контактная сила, a — ударное ускорение, t — время процесса взаимодействия [1].

Процесс соударения ударника с поверхностью материала состоит из двух этапов: нагружения и разгрузки. В ходе этапа нагружения (рисунок 9, б) ударник работает только в области упругой деформации (твердость индентора $>$ твердости материала), а материал испытывает упругопластичное деформирование. В процессе внедрения ударника контактная сила P и ударное ускорение a постоянно нарастают, скорость внедрения v падает, а величина деформации S увеличивается. В конце нагружения кинетическая энергия ударника переходит в потенциальную энергию сжатых тел за исключением работы, затраченной на упругопластическое деформирование индентора и материала; при этом величины ударного ускорения и деформации максимальны (a_{\max} , S_{\max}), а скорость $v=0$. В следующий момент времени наступает этап разгрузки (рисунок 9, в) — восстановления упругих деформаций соударяющихся

тел за время. Значения P и a падают до нуля, ударник под действием упругих сил приобретает конечную скорость отскока v_R , материал восстанавливается до глубины пластического отпечатка $S_{пл}$, а потенциальная энергия сжатых тел переходит в кинетическую энергию отскакивающего ударника.

Для удобства процесс взаимодействия индентора ударника с испытуемым образцом разобьем на 3 этапа, как показано на рисунке 9:

- 1) начало контакта ударника с материалом (разгон);
- 2) контакт соударяющихся тел (внедрение);
- 3) выходу ударника из контакта (отскок).

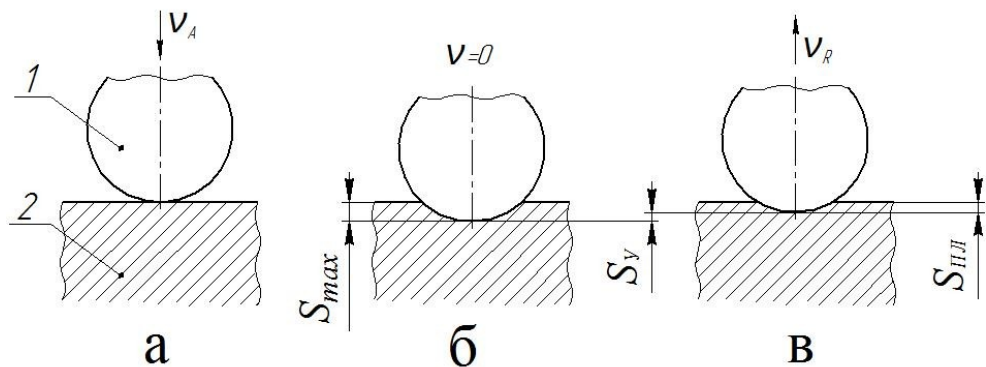


Рисунок 9 – Этапы взаимодействия индентора ударника (1) с испытуемым образцом (2)

Изменение скорости ударника во времени представлено на рисунке 10.

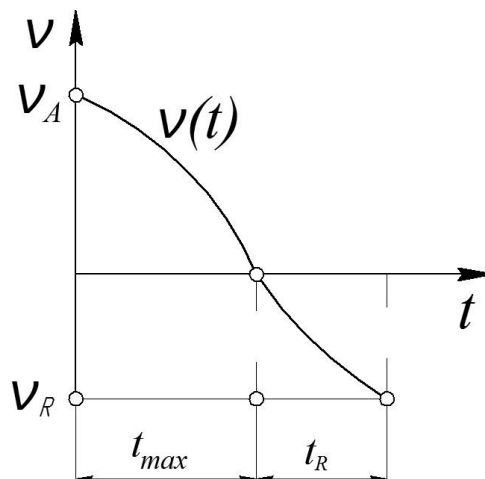


Рисунок 10 – Зависимость скорости от времени процесса соударения, где v_A — скорость удара (начальная скорость соударения с материалом); v_R — скорость отскока ударника; t_{max} — длительность упругопластической деформации; t_R — длительность восстановления упругих деформаций

Текущее и максимальное ускорение ударника в ходе процесса соударения рассчитывается путем дифференцирования сигнала (рисунок 11). Зная массу ударника и получив ускорение по формуле (6) можно рассчитать контактное усилие:

$$P(t) = -m \cdot a(t) = -m \cdot \frac{dv(t)}{dt} \quad (6)$$

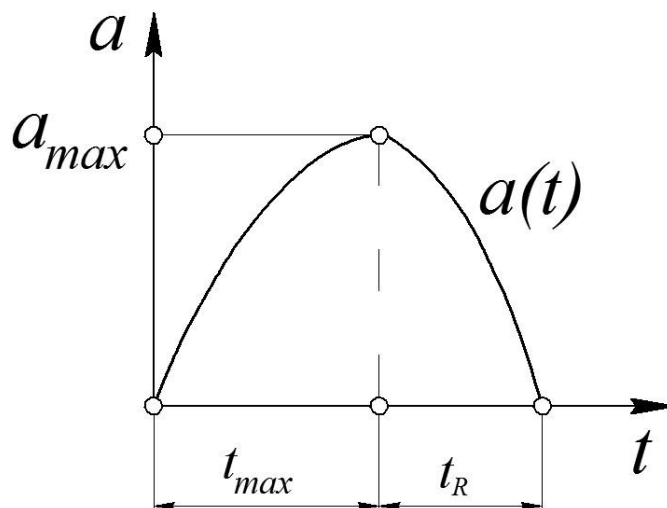


Рисунок 11 – Зависимость ускорения от времени, где a и a_{max} — текущее и максимальное ударное ускорение; t_{max} — длительность упругопластической деформации; t_R — длительность восстановления упругих деформаций

По сравнению со статическим вдавливанием, продолжительность приложения нагрузки при динамических измерениях твердости зависит от фрикционных свойств и коэффициента восстановления (который сам по себе зависит от скорости соударения) испытуемого образца и индентора ударника.

Глубину внедрения индентора (рисунок 12) ударника в испытуемый образец можно рассчитать путем интегрирования исходного сигнала скорости по формуле (7):

$$S(t) = \int_{t_0}^t v(t) dt. \quad (7)$$

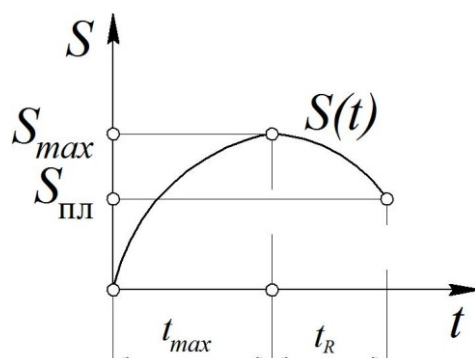


Рисунок 12 – Зависимость глубины внедрения от времени, где S_{max} и $S_{пл}$ — максимальная упругопластическая и пластическая (остаточная) деформация материала; где t_{max} — длительность упругопластической деформации; t_R — длительность восстановления упругих деформаций

Все вышеперечисленные параметры, вычисляемые из исходного сигнала, помогают описать случай контакта падающего ударника на испытуемый образец, однако не используются для расчета твердости по методу Либа. Основным контролируемым параметром при измерении твердости по методу Либа является скорость отскока ударника с нормированными параметрами, падающего на поверхность материала с заданной скоростью удара.

При этом для обеспечения единства измерений нормируются следующие параметры:

- кинетическая энергия ударного взаимодействия;
- скорость ударника в момент контакта с поверхностью;
- расстояние между индентором и поверхностью испытуемого образца в момент измерения скорости;
- масса ударника;
- материал и радиус индентора;
- масса и толщина испытуемого образца.

Основным параметром, участвующим в расчете твердости по методу Либа является коэффициент восстановления. Коэффициент восстановления e определяется как отношение скорости отскока ударника от поверхности испытуемого образца v_R и скорости удара v_A (8) и записывается как:

$$e = v_R/v_A. \quad (8)$$

2.2 Теоретический анализ зависимости коэффициента восстановления от параметров измерительного преобразователя и механических свойств испытуемого образца

Для нахождения контактных напряжений при пластическом ударе применяется квазистатический подход в предположении, что скорость удара мала в сравнении со скоростью упругой волны [31]. Наличие пластического течения уменьшает интенсивность контактного давления и энергию, идущую на упругое волновое движение. Соотношения для неупругих контактных напряжений при статических условиях могут быть использованы при скорости удара до 500 м/с с целью исследования процесса соударения при нормальном ударе по отношению к поверхности [31].

Кинетическая энергия переходит в локальные и упругие пластические деформации контактирующих тел до момента максимального сжатия и находится по формуле (9):

$$\frac{1}{2}mv_A^2 = W = \int_0^{\delta_{max}} P d\delta, \quad (9)$$

где m - масса ударника, P – контактное усилие, δ – совокупное упруго-пластическое взаимное сближение (сжатие) образца и индентора. После момента максимального сжатия кинетическая энергия при отскоке находится по формуле (10) и равна работе, совершенной за время упругого восстановления, то есть

$$\frac{1}{2}mv_R^2 = W' = \int_{\delta_{max}}^{\delta_{пл}} P' d\delta', \quad (10)$$

где величины со штрихом относятся к восстановлению. Далее нужно определить максимальные контактные напряжения, продолжительность удара и коэффициент восстановления v_R/v_A через скорость удара v_A и свойства соударяющихся тел. Дальнейший анализ ограничен рассмотрением сферических профилей [31].

Пластическое течение начинается в точке под поверхностью, и, по мере того как распространяется пластическая зона, среднее контактное давление возрастает от $\sim 1.1Y$ до $\sim 3Y$, когда достигается полная пластичность (Y – предел текучести). В дальнейшем, если нет деформационного упрочнения, контактное

давление сохраняется примерно постоянным и называется давлением течения или давлением текучести [31].

Поскольку большинство соударений металлических тел приводит к полностью пластическому вдавливанию, сосредоточим внимание на рассмотрении этого режима. В приводимом статическом анализе предполагается, что полное упругое и пластическое сжатие δ связано с размерами контактной зоны соотношением $\delta = a^2/2R$ (т. е. ни султан, ни «воронка» не образуются в зоне контакта) и среднее контактное давление p_m постоянно и равно $3.0Y$. Эти предположения хорошо соответствуют экспериментальным результатам. Используя уравнения (9), получим следующее уравнение (11):

$$\frac{1}{2}mv_A^2 = \int_0^{a_{max}} \pi a^2 p_d(a/R) da = \frac{\pi a^4 p_d}{4R}, \quad (11)$$

где p_d — среднее контактное давление при динамическом нагружении. Отметим, что величина $\pi a^4/4R$ есть «кажущаяся» величина объема материала V_a , замещаемого индентором радиуса R [31].

Используя уравнение $a = \left(\frac{3PR}{4E^*}\right)^{1/3}$ для исключения радиусов, кинетическую энергию отскока можно определить через размер области вдавливания по формуле (12):

$$\frac{1}{2}mv_R^2 = W' = \frac{3P^2}{10aE^*} = \frac{3}{10}\pi^2 a^3 p_d^2/E^*, \quad (12)$$

где E^* - приведенный модуль упругости, $1/E^* = (1 - \nu_1^2/E_1) + (1 - \nu_2^2/E_2)$, где ν_1, ν_2 — коэффициенты Пуассона и E_1, E_2 — модули упругости для взаимодействующих материалов [31].

Исключая a из уравнений (11) и (12), получаем выражение для коэффициента восстановления (13):

$$e^2 \equiv \frac{v_R^2}{v_A^2} = \frac{3\pi^{5/4}4^{3/4}}{10} \left(\frac{p_d}{E^*}\right) \left(\frac{\frac{1}{2}mv_A^2}{p_d R^3}\right)^{-1/4}, \quad (13)$$

или, если записать $p_d \approx 3.0Y_d$ (Y_d — динамический предел текучести), то получим уравнение (14):

$$e \approx 3.8(Y_d/E^*)^{1/2} \left(\frac{\frac{1}{2}mv_A^2}{Y_d R^3}\right)^{-1/8}. \quad (14)$$

Из этих уравнений, подтвержденных результатами экспериментов видно, что в общем случае коэффициент восстановления соударяемых тел, способных претерпевать пластическую деформацию, не будет постоянным. При очень низких скоростях удара возникающие давления будут недостаточными для того, чтобы вызвать пластическую деформацию [42, 68]. Процесс столкновения будет полностью упругим, а коэффициент восстановления будет равен единице. По мере увеличения скорости удара степень пластической деформации будет неуклонно возрастать, и произойдет соответствующее уменьшение коэффициента восстановления.

Таким образом, из теоретического анализа процесса удара следует, что в соответствии с уравнением (14) коэффициент восстановления является функцией следующих параметров измерительной установки и условий измерений (15):

$$e \sim v_A^{-\frac{1}{4}}; e \sim m^{-\frac{1}{8}}; e \sim R^{\frac{3}{8}} \quad (15)$$

Возьмем частные производные уравнения (14) по перечисленным параметрам и получим формулы (16-18):

$$\frac{\partial e}{\partial v_A} = e \left(-\frac{1}{4}\right) v_A^{-1}, \text{ отсюда:}$$

$$\frac{\Delta e_v}{e} = -\frac{1}{4} v_A^{-1} \Delta v = -\frac{\Delta v_A}{4 v_A} \quad (16)$$

$$\frac{\partial e}{\partial m} = e \left(-\frac{1}{8}\right) m^{-1}, \text{ отсюда:}$$

$$\frac{\Delta e_m}{e} = -\frac{\Delta m}{8 m} \quad (17)$$

$$\frac{\partial e}{\partial R} = e \frac{3}{8} R^{-1}, \text{ отсюда:}$$

$$\frac{\Delta e_R}{e} = \frac{3}{8} \frac{\Delta R}{R} \quad (18)$$

Соответственно суммарная относительная неопределенность измерительной установки, связанная с погрешностью параметров установки рассчитывается по формуле (19):

$$\Delta e_\Sigma = \sqrt{\sum_i \left(\frac{\Delta e_i}{e}\right)^2}, \quad (19)$$

где $i \Leftrightarrow v, m, R$.

Формулы (16), (17) и (18) выражают относительное изменение коэффициента восстановления e от относительного изменения параметров установки и позволяют рассчитать вклад неопределенности каждого из параметров в неопределенность результата измерения [72].

2.3 Анализ влияния параметров измерительного преобразователя на результат измерения твердости по методу Либя

Твердость материала зависит от множества факторов: состава и структуры материала, метода измерения (прикладываемой нагрузки, скорости нагружения, формы индентора) и не является однозначно определяемой величиной

2.3.1 Влияние формы индентора на измерение твердости

Зависимость напряжение σ – деформация ε является наиболее полным описанием упруго-пластических свойств материалов (рисунок 13). Кривая описывает случай одноосного растяжения или сжатия.

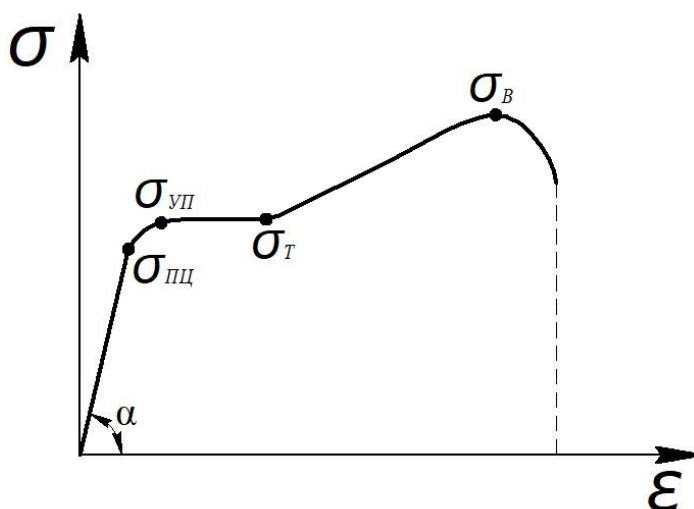


Рисунок 13 – Кривая напряжение-деформация $\sigma_{ПЦ}$ – предел пропорциональности, $\sigma_{УП}$ – предел упругости, $\sigma_{Т}$ – предел текучести, $\sigma_{В}$ – предел прочности [5]

Внедрение индентора в испытуемый объект способствует появлению деформации ε в области контакта индентора с поверхностью и возникновению напряжения σ . Интеграл напряжений по площади отпечатка описывает силу, противодействующую внедрению индентора. При достижении максимальной

глубины внедрения, в процессе выдержки под нагрузкой, сила сопротивления материала и сила, приложенная к индентору равны. Отношение этой силы к площади проекции области контакта является средним контактным давлением под индентором и измеряется в Н/м^2 или в Паскалях [8].

Форма индентора влияет на распределение значений контактного давления под индентором, а также деформаций и напряжений (рисунок 14) [9]. Таким образом, при приложении одинакового усилия к инденторам разной формы, полученные значения площади отпечатков будут различаться. Данный факт влияет на то, что результаты, полученные различными методами измерения твердости с использованием инденторов разной формы не могут быть однозначно сопоставлены друг с другом. Пересчет значений твердости между шкалами возможен только для определенных групп металлов и сплавов, имеющих одинаковую зависимость $\sigma(\epsilon)$.

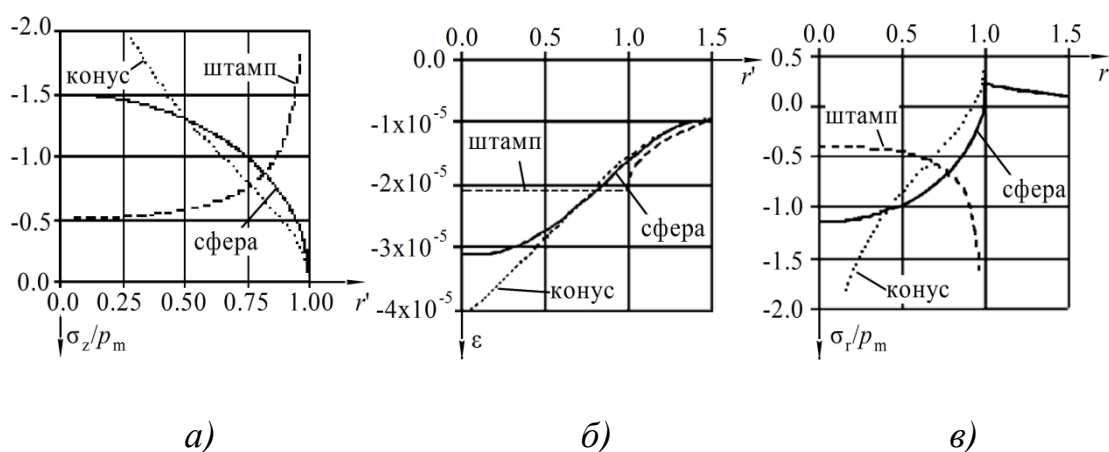


Рисунок 14 – Графики распределений контактного давления, деформаций и поверхностных упругих напряжений для сферического индентора, цилиндрического плоского штампа и конических инденторов в зависимости от нормированного расстояния от центра $r' = r/a$, где a - радиус площади контакта: а) распределение нормированного контактного давления σ_z/p_m ; б) прогиб поверхности (смещения в мм, рассчитанные для $p_m = 1$ МПа, радиуса окружности контакта = 1 мм и для $E = 70000$ МПа); в) значения нормированного поверхностного радиального напряжения σ_r/p_m (Рассчитаны для коэффициента Пуассона = 0.26).

* p_m – среднее контактное давление. [9]

2.3.2 Влияние скорости деформации

Описанные выше положения справедливы для случая квазистатического нагружения, при котором в цикле нагружения нагрузка прикладывается плавно, деформация происходит постепенно, после чего осуществляется выдержка при достижении максимальной нагрузки в течение определенного количества времени, обычно от единиц до десятков секунд. В это время в деформированном материале под индентором происходит релаксация напряженных состояний, что позволяет исключить влияние движения дислокаций на результат измерения. Упругая деформация под индентором влияет только на разницу между площадью контакта индентора с поверхностью под нагрузкой и после снятия нагрузки [4, 79].

Динамичность нагружения образца при одноосном деформировании характеризуется:

- скоростью деформации $\dot{\epsilon}$ (в 1/с);
- скоростью нарастания нагрузки $\dot{\sigma}$ (в кгс/мм²/с);
- скоростью удара v_A (в м/с).

Наиболее точной характеристикой динамического процесса нагружения является скорость деформации. Поскольку процесс деформирования при ударе носит нестационарный характер, пользуются условным понятием средней скорости деформации.

Известно, что при статических испытаниях $\dot{\epsilon} = 10^{-1} \div 10^{-6}$ 1/с, а при ударных обычно $\dot{\epsilon} = 10 \div 10^3$ 1/с. Известно также, что скорость деформации пропорциональна скорости удара v_A . Экспериментально установлено, что повышение скорости деформации при нормальной температуре приводит к увеличению предела текучести как при сжатии, так и при растяжении различных материалов. Так при уменьшении статического предела текучести стали влияние скорости удара на динамический предел текучести заметно возрастает. С возрастанием скорости деформации увеличение динамического предела текучести

замедляется, что наглядно показано на рисунок 15, где представлена зависимость $\sigma_{Т.д.} = f(\dot{\epsilon})$ для углеродистой стали (0,22% С).

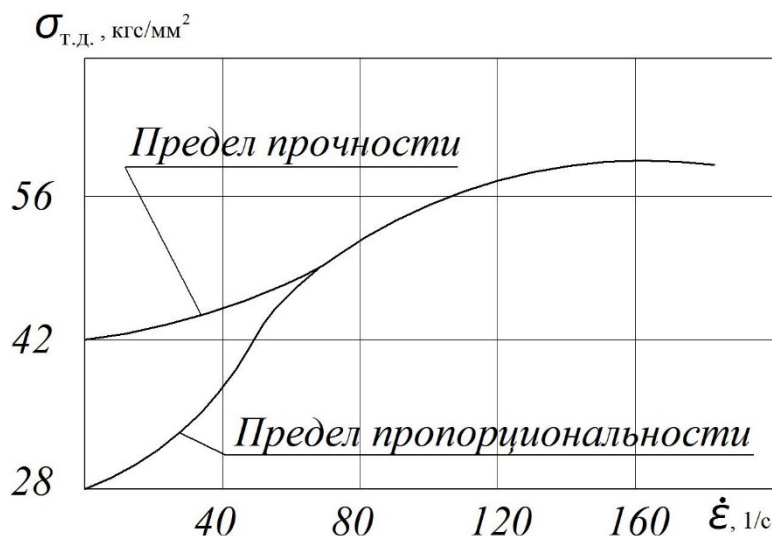


Рисунок 15 – Графики зависимости динамического предела текучести и предела прочности от скорости деформации [32]

Поведение динамического предела текучести при сжатии качественно аналогично поведению его при растяжении. Увеличение скорости деформации до $\dot{\epsilon} = (0,044 \div 0,067) \cdot 10^4$ 1/с, что соответствует скорости удара $v_A = 10 \div 12$ м/с, приводит к существенному изменению динамического предела текучести, в то время как при изменении скорости деформации в 20—30 раз при скоростях удара $v_A > 10$ м/с увеличение динамического предела текучести становится несущественным. При таких скоростях удара можно, очевидно, считать, что физико-механические характеристики материалов изменяются незначительно. Вместе с тем, следует отметить, что при динамическом нагружении имеет место некоторая нивелировка физико-механических характеристик материалов. Однако, несмотря на некоторую нивелировку механических характеристик для разнородных материалов, разница в их свойствах все же сохраняется.

2.3.3 Обобщенная структура средств измерений твердости по шкале Либа

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 (рисунок 16).

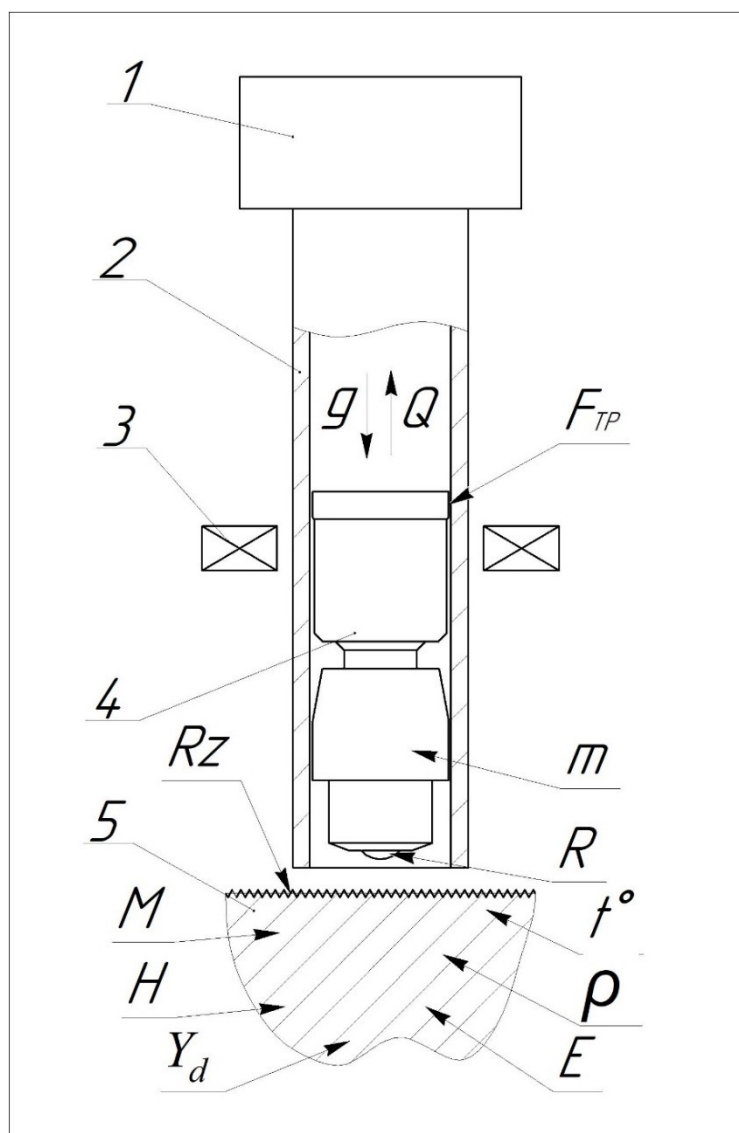


Рисунок 16 – Обобщенная структурная схема средств измерений твердости по шкале Либа: 1 – блок удержания и разгона/сброса ударника, 2 – направляющая трубка, 3 – узел измерения скоростей v_A и v_R , 4 – ударник, 5 – испытуемый образец (ИО). Где E - модуль упругости ИО, Y_d - динамический предел текучести, 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_{TP} - сила трения, возникающая между стенками направляющей трубки и ударником.

Измеряемым параметром является коэффициент восстановления e , являющийся по определению отношением скорости отскока v_R к скорости удара v_A : $e \equiv \frac{v_R}{v_A}$. Значение величины твердости по Либу вычисляется по формуле:

$$HL = 1000 \frac{v_R}{v_A} \equiv 1000 * e.$$

Выделены следующие влияющие параметры:

- модуль упругости E ;
- динамический предел текучести Y_d ;
- масса ударника m ;
- радиус сферического наконечника R ;
- скорость падения ударника v_A ;
- масса ИО M ;
- толщина ИО H ;
- плотность ИО ρ ;
- температура t° окружающей среды и ОК;
- шероховатость Rz поверхности ИО и покрытия;
- ускорение свободного падения g ;
- сила сопротивления воздуха Q ;
- сила трения $F_{тр}$, возникающая между стенками направляющей трубки

и ударником.

В соответствии с выражением (8) модуль упругости E и динамический предел текучести Y_d являются основными свойствами материала ИО, определяющими значение твердости по шкалам Либа.

Масса ударника m , радиус сферического наконечника R , скорость удара v_A являются основными контролируемыми параметрами твердомеров Либа.

Ускорение свободного падения g , сила сопротивления воздуха Q , сила трения $F_{тр}$ являются источником систематического отклонения скорости ударника от номинального. Их влияние учитывается и компенсируется путем независимого измерения и настройки скорости удара v_A .

Масса M , толщина H , плотность ρ , шероховатость Rz испытуемого образца не должны выходить за установленные границы в соответствии с требованиями стандарта [75-77], либо их влияние должно учитываться при анализе результатов измерений.

Влияние температуры окружающей среды на твердомер учитывается в соответствии с его эксплуатационной документацией (паспортом и РЭ). Изменение твердости по шкале Либса материала образца при изменении температуры является его естественным свойством.

2.3.4 Оценка влияния отклонения основных контролируемых параметров твердомеров Либса на результаты измерений

Расчет влияния контролируемых параметров на значение измеряемого значения твердости по Либсу произведен в соответствии с формулами (9-11). Номинальные значения и предельно допустимые отклонения контролируемых параметров указаны в соответствии с требованиями международных стандартов [75-77].

Расчет суммарного относительного отклонения коэффициента восстановления Δe_{Σ} производится по формуле (19).

В таблице 2 приведены значения контролируемых параметров, их предельных нормируемых отклонений и расчетные значения относительного отклонения коэффициента восстановления $\Delta e/e$ для эталонной установки 2-го разряда, в таблице 2 - для рабочих средств измерений по шкале D.

Таблица 2 – Расчетные значения относительного отклонения коэффициента восстановления $\Delta e/e$ от нормируемых предельных отклонений контролируемых параметров для эталонной установки 2-го разряда по шкале D.

Параметр	Номинальное значение параметра	Предельное отклонение параметра	Относительное предельное отклонение параметра, %	Относительное предельное отклонение e , %
v_A	2,05 м/с	0, 0025 м/с	0,12	0,03

Продолжение таблицы 2

Параметр	Номинальное значение параметра	Предельное отклонение параметра	Относительное предельное отклонение параметра, %	Относительное предельное отклонение e , %
m	5,45 г	0,03 г	0,55	0,07
R	1,5 мм	0,003 мм	0,2	0,075
				$\Delta e_{\Sigma} = 0,1 \%$

Таблица 3 – Расчетные значения относительного отклонения коэффициента восстановления $\Delta e/e$ от нормируемых предельных отклонений контролируемых параметров для рабочих средств измерений по шкале D.

Параметр	Номинальное значение параметра	Предельное отклонение параметра	Относительно e предельное отклонение параметра, %	Относительное предельное отклонение $\Delta e/e$, %
v_A	2,05 м/с	0, 1 м/с	5	1,2
m	5,45 г	0,5 г	9	1,1
R	1,5 мм	0,005 мм	0,3(3)	0,1
				$\Delta e_{\Sigma} = 1,7 \%$

2.4 Выводы по главе 2

1. Рассмотрены особенности метода измерения твердости по шкалам Либа и основы обеспечения единства измерений твердости по шкалам Либа;

2. 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_A , массу ударника m , радиус

наконечника R , а также физико-механические свойства материала сферического наконечника.

3. 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 измерения.

ГЛАВА 3 АНАЛИЗ НОРМИРУЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭТАЛОНОВ И СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ ТВЕРДОСТИ ПО ШКАЛАМ ЛИБА. РАЗРАБОТКА СТРУКТУРЫ ИЕРАРХИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ПЕРЕДАЧИ ЕДИНИЦЫ ТВЕРДОСТИ ПО ШКАЛЕ ЛИБА (ПРОЕКТА ПОВЕРОЧНОЙ СХЕМЫ)

3.1 Установление требований в целях обеспечения единства измерений твердости по шкалам Либа

Во второй главе определены основные параметры упругого соударения, влияющие на результат измерений твердости по шкалам Либа. Для обеспечения единства измерений к другому необходима строгая регламентация данных параметров.

В настоящее время требования к метрологическим характеристикам средств измерений по Либу регламентированы рядом международных стандартов, описывающих метод измерения твердости по Либу [75-77]. В частности, стандарт [76] устанавливает, как требования, которые предъявляются к техническим параметрам измерительных преобразователей при поэлементной (direct) поверке (калибровке), так и требования к результатам поверки (калибровки) с использованием эталонных мер твердости.

В частности, для обеспечения повторяемости результатов измерений необходимо соблюдение требований к следующим параметрам:

- Скорости удара v_A ;
- Максимальному расстоянию от сферического наконечника до поверхности образца при измерении скорости;
- Массе ударника (включая наконечник) m ;
- Радиусу сферического наконечника R ;
- Материалу наконечника;
- Твердости наконечника по шкале Виккерса HV;
- Минимальному выступу сферической поверхности наконечника относительно держателя наконечника.

Установленные к рабочим средствам измерений твердости требования удовлетворяют потребности промышленных предприятий при контроле твердости в производственных условиях, а также при измерении твердости в условиях ЦЗЛ.

С целью достижения заданной стандартом точности измерений и обеспечения прослеживаемости результатов измерений в ISO 16859-1_2015(E), приложение С1 предлагается следующая структура обеспечения прослеживаемости для определения и распространения шкал твердости Либа, (Рисунок 17) [47].



Рисунок 17 – Обобщенная структура обеспечения прослеживаемости (метрологической цепи) для определения и распространения шкал твердости Либа [47]

Для внедрения средств измерений твердости по шкалам Либа в Российской Федерации предлагается разработать и утвердить поверочную схему в соответствии с ГОСТ 8.061-80 [26] на основе разработанного проекта иерархической схемы передачи единицы твердости по шкале Либа (проект

поверочной схемы) и требований международных стандартов. Для разработки проекта поверочной схемы необходимо определить и регламентировать требования к:

- государственному первичному эталону.
- эталонным мерам твердости 1-го разряда;
- эталонным установкам 2-го разряда;
- эталонным мерам твердости 2-го разряда;
- параметрам рабочих средств измерений;

В связи с наиболее широким распространением и универсальностью здесь и далее рассматриваются требования к эталонным установкам, мерам и рабочим средствам измерений по шкале Либа D.

3.2 Государственный первичный эталон

Государственный первичный эталон твердости по Либу создается, утверждается, содержится и применяется в соответствии с ГОСТ Р 8.809 и воспроизводит значение твердости с минимальной неопределенностью, которую можно получить при текущем уровне развития науки и техники.

3.3 Характеристики эталонных мер твердости

Эталонные меры твердости 1-го и 2-го разряда разделяются на три диапазона [< 500 HLD], [$500 - 700$ HLD], [> 700 HLD] и, согласно требованиям стандарта, должны соответствовать установленными требованиями на однородность, характеризующуюся коэффициентом V_H .

Коэффициент вариации является статистическим параметром и характеризует относительную меру отклонения измеренных значений твердости от среднеарифметического. Значения твердости по Либу, полученные в результате измерений на рабочей поверхности меры, обозначаются H_1, H_2, \dots, H_{10} [51].

Коэффициент вариации рассчитывается по формуле (20):

$$V_H = \frac{s_H}{\bar{H}} * 100 \%, \quad (20)$$

где s_H – стандартное отклонение, определяемое по формуле (21):

$$s_H = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (H_i - \bar{H})^2}{n-1}}, \quad (21)$$

где \bar{H} - среднее арифметическое значение твердости, рассчитываемое по формуле

(22):

$$\bar{H} = \frac{H_1 + H_2 + \dots + H_{10}}{10} \quad (22)$$

Максимальный коэффициент вариации для мер твердости 1-го разряда для ударных преобразователей типа D не должен превышать 0,5 % во всем диапазоне значений.

3.4 Требования к максимальному коэффициенту вариации для мер твердости 1-го разряда для ударных преобразователей типа D

Требования к максимальному коэффициенту вариации для мер твердости 1-го разряда для ударных преобразователей типа D приведен в таблице 4.

Таблица 4 – 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	$\pm 0,5$

3.5 Требования к эталонным установкам 2-го разряда при поверке по эталонным мерам твердости 1-го разряда

При поверке по эталонным мерам твердости рабочие эталонные установки должны удовлетворять требованиям по минимальной повторяемости W_H и предельной ошибке G_H . На каждой эталонной мере твердости проводится не менее 10 единичных измерений [51].

3.5.1 Предельная ошибка

При поверке по эталонным мерам твердости требования к предельному отклонению твердости по Либу удовлетворены, когда выполняется условие (23):

$$G_H \geq |b_H(H)| + u_{CRM}, \quad (23)$$

где G_H - предельная ошибка твердости по Либу;

u_{CRM} - неопределенность эталонной меры твердости на основе свидетельства о поверке (сертификата о калибровке) при $k = 1$;

b_H - погрешность твердости по Либу, определяемое по формуле (24):

$$b_H = \frac{1}{n} \sum_1^n H_i - H_{CRM}, \quad (24)$$

где H_{CRM} - значение твердости по Либу эталонной меры твердости на основе свидетельства о поверке (сертификата о калибровке);

H_i - единичное измерение твердости по Либу [51].

3.5.2 Минимальная повторяемость

При поверке эталона 2-го разряда требования к минимальной повторяемости измерений твердости по Либу будут выполняться при условии (25):

$$W_H \geq V_H, \quad (25)$$

где W_H - минимальная повторяемость измерений твердости.

Коэффициент вариации V_H вычисляется по формуле (26):

$$V_H = \frac{s_H}{H} * 100 \%. \quad (26)$$

Стандартное отклонение s_H вычисляется по формуле (27):

$$s_H = \sqrt{\frac{\sum_1^n (H_i - \bar{H})^2}{n-1}}, \quad (27)$$

где \bar{H} - среднее значение измерений твердости вычисляется по формуле (28):

$$\bar{H} = \frac{1}{n} \sum_1^n H_i. \quad (28)$$

Требования к техническим параметрам эталонной установки твердости по Либу 2-го разряда для шкалы либа D представлены в таблице 5 [51].

Таблица 5 – 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

3.6 Требования к максимальному коэффициенту вариации для мер твердости 2-го разряда для ударных преобразователей типа D

Требования к максимальному коэффициенту вариации для мер твердости 2-го разряда для ударных преобразователей типа D приведены в таблице 6 [51].

Таблица 6 – 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	$\pm 1,0$

3.7 Требования к рабочим средствам измерений

При поверке по эталонным мерам твердости рабочие средства измерений должны удовлетворять требованиям по коэффициенту вариации V_H и относительной предельно допустимой погрешности E_{rel} [51].

3.7.1 Коэффициент вариации

Коэффициент вариации рассчитывается по формуле (29):

$$V = \frac{s(H)}{\bar{H}} * 100 \%, \quad (29)$$

где $s(H)$ - стандартное отклонение (девиация) для $n = 10$ отсчетов твердости по Либу, определяемое по формуле (30):

$$s(H) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (H_i - \bar{H})^2}{n-1}} \quad (30)$$

Среднее арифметическое значение \bar{H} для $n = 10$ результатов измерений твердости по Либу рассчитывается по формуле (31):

$$\bar{H} = \frac{H_1 + H_2 + \dots + H_n}{n} \quad (n = 10), \quad (31)$$

где H_1, H_2, \dots, H_n – результаты измерений твердости по Либу;
 n - количество измерений [51].

3.7.2 Ошибка рабочего средства измерений (твердомера)

Ошибка твердомера определяется по формуле (32):

$$E = \bar{H} - H_{\text{CRM}}, \quad (32)$$

где H_{CRM} – среднее значение эталонной меры твердости на основе свидетельства о поверке (сертификата о калибровке).

Относительная предельно допустимая погрешность твердомера рассчитывается по формуле (33):

$$E_{\text{rel}} = \frac{\bar{H} - H_{\text{CRM}}}{H_{\text{CRM}}} * 100 \% \quad (33)$$

Требования к техническим параметрам рабочих средств измерений твердости для шкалы Либа D представлены в таблице 7 [51].

Таблица 7 – Требования для рабочих средств измерений твердости [51]

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)	$5,45 \pm 0,50$
R	мм	Радиус сферического наконечника	$1,500 \pm 0,005$

Продолжение таблицы 7

Обозначение	Ед. измерения	Наименование	Значение
		Материал наконечника	WC-Co; соотношение: другие карбиды: < 2 % веса; кобальт: 5 - 7 % веса; плотность (14,8 ± 0,2) г/см ³
HV	HV10	Твердость наконечника по шкале Виккерса	1600 ± 100
dx	мм	Минимальный выступ сферической поверхности наконечника относительно держателя наконечника	0,3

3.8 Проект поверочной схемы для средств измерений твердости по шкале Либа D

В таблице 8 приведены значения метрологических характеристик эталонов и СИ твердости по шкале Либа D, установленные международными стандартами. Таблица 8 – Метрологические характеристики эталонов и СИ твердости по шкале Либа D

Меры твердости 1-го разряда		
Диапазоны твердости по Либу, HLD	Максимальный коэффициент вариации V_H , %	
< 500	± 0,5	
500 - 700	± 0,5	
> 700	± 0,5	
Эталонные установки 2-го разряда		
Диапазоны твердости по Либу, HLD	Минимальная повторяемость W_H , %	Предельная ошибка G_H , %

Продолжение таблицы 8

Диапазоны твердости по Либу, HLD	Минимальная повторяемость W_H , %	Предельная ошибка G_H , %
< 500	1,0	$\pm 2,0$
500 - 700	1,0	$\pm 1,5$
> 700	1,0	$\pm 1,0$
Меры твердости 2-го разряда		
	Максимальный коэффициент вариации V_H , %	
< 500	$\pm 2,0$	
500 - 700	$\pm 1,5$	
> 700	$\pm 1,0$	
Твердомеры		
	Коэффициент вариации твердомера V , %	Предельно допустимая погрешность твердомера E_{rel} , %
< 500	2,5	$\pm 4,0$
500 - 700	2,0	$\pm 3,0$
> 700	1,5	$\pm 2,0$

В соответствии со значениями, приведенными в таблице 7 разработан проект поверочной схемы передачи единицы твердости по Либу, шкала D (Рисунок 18). Для обеспечения воспроизведения и передачи единицы твердости по Либу необходимо исследовать разработанную установку на соответствие требованиям к эталонной установке 2-го разряда.

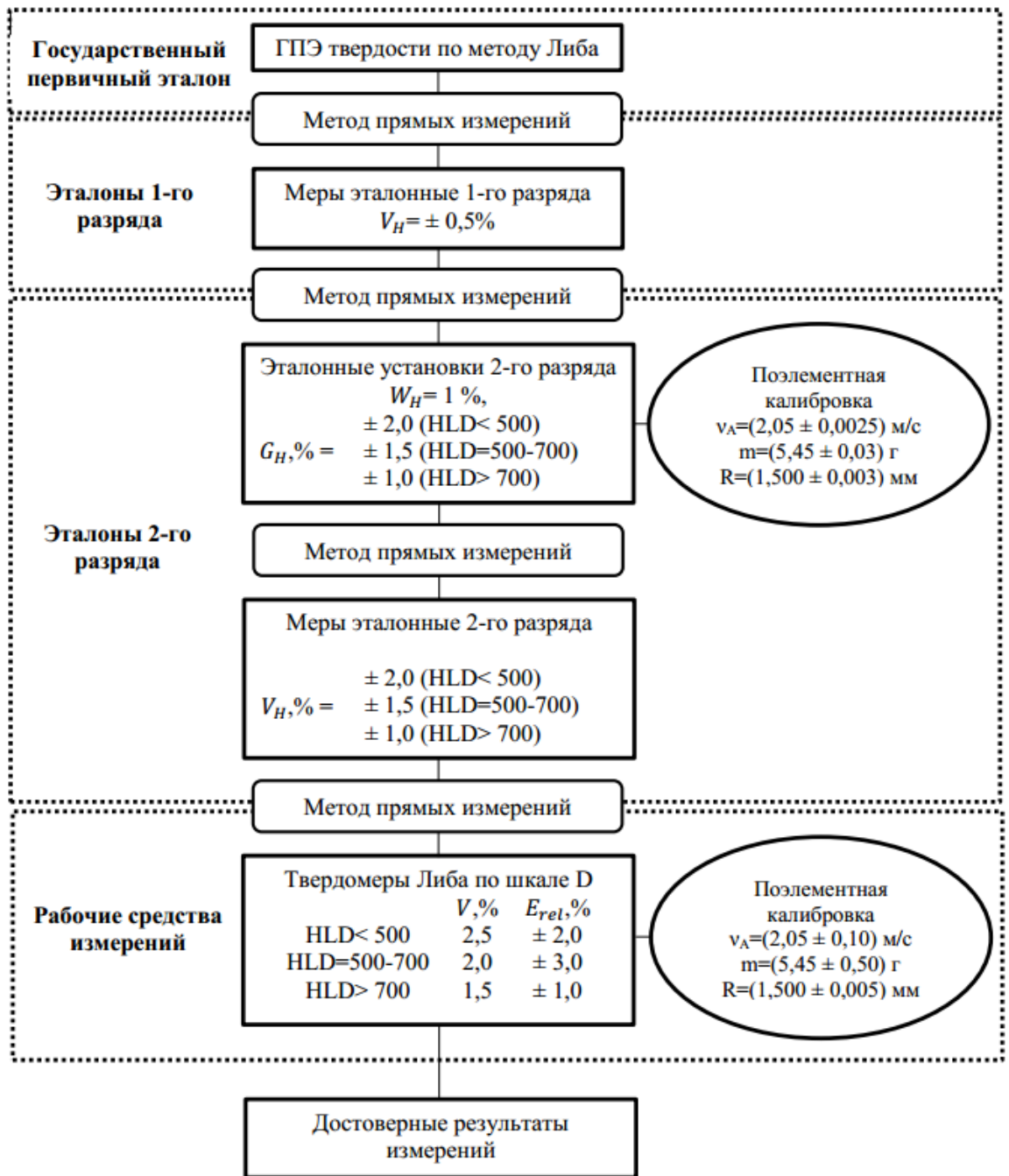


Рисунок 18 – Поверочная схема твердости по Либу, шкала D (проект)

3.9 Выводы по главе 3

1. Проанализированы метрологические характеристики эталонов и средств измерений твердости по шкалам Либа;
2. Определены нормируемые параметры эталонных установок, мер и средств измерений твердости по шкалам Либа;

3. Предложен проект поверочной схемы, обеспечивающий неопределенность результатов измерений в соответствии с действующими стандартами. В отличие от принятой трехступенчатой поверочной схемы, предложенный проект затрагивает не только шкалы HLD и HLG, а также включает в себя эталонные установки первого и второго разряда, что в условиях применения в РФ позволяет обеспечить потребность промышленности и сохранность ГПЭ.

ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА ПРОТОТИПА ЭТАЛОННОЙ УСТАНОВКИ ТВЕРДОСТИ ПО ЛИБУ 2-ГО РАЗРЯДА

4.1 Анализ конструктивных решений и применяемых методов измерений для создания прототипа эталонной установки

Согласно предложенному проекту иерархической схемы передачи единицы твердости эталон твердости по Либу 2-го разряда включает в себя стационарный прибор, воспроизводящий шкалу Либба, с заданными техническими и метрологическими характеристиками (далее – эталонная установка) и комплект средств измерений для поэлементного контроля его параметров. Для разработки прототипа эталонной установки необходимо проанализировать варианты реализации схем разгона ударника и измерения его скорости [61].

4.1.1 Анализ и экспериментальное исследование ударного преобразователя с пружинным механизмом разгона ударника

В настоящее время во всех рабочих средствах измерений твердости по шкалам Либба для разгона ударника используются пружинные механизмы разгона (рисунок 19). При этом для соблюдения требований к скорости удара необходимо проведение расчета жесткости пружины.

Для расчета используется модель, в которой пружина с жесткостью C_S перед разгоном ударника сжата на величину S_0 . Толкающее усилие пружины F изменяется по мере разгона ударника пропорционально изменению хода пружины согласно формуле (34):

$$F = C_S S_0 - C_S S = C_S (S_0 - S). \quad (34)$$

В процессе разгона с ускорением a усилие пружины уравновешивается инерционной массой m ударника согласно формуле (35):

$$F = m(a + g). \quad (35)$$

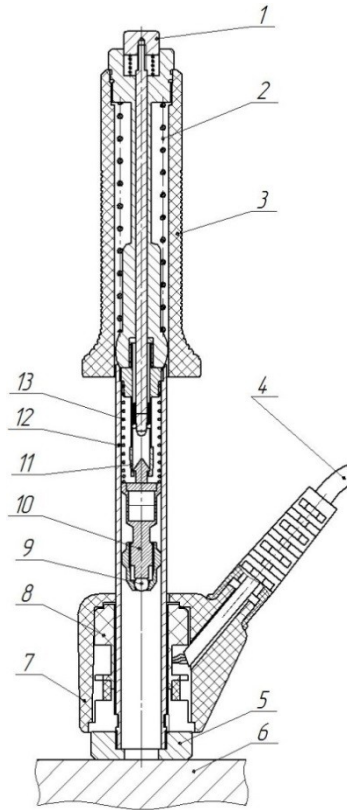


Рисунок 19 – Схематическое изображение ударного преобразователя (Тип D) перед ударом (ударная пружина взведена): 1 – кнопка спуска; 2 – взводящая пружина; 3 – взводящая трубка; 4 – соединительный кабель; 5 – опорное кольцо; 6 – испытуемый образец; 7 – корпус катушки индуктивности; 8 – катушка индуктивности; 9 – сферический наконечник; 10 – ударник; 11 – цанга; 12 – направляющая трубка; 13 – ударная пружина

Перемещение ударника S на этом участке описывается уравнением (36):

$$m \left(\frac{d^2 S}{dt^2} + g \right) = C_S (S_0 - S). \quad (36)$$

После преобразования получаем дифференциальное уравнение, соответствующее консервативному звену (37):

$$\frac{m}{C_S} \frac{d^2 S}{dt^2} + S = S_0 - \frac{m g}{C_S} = S_0 \left(1 - \frac{m g}{C_S S_0} \right). \quad (37)$$

Решение этого уравнения имеет вид выражения (38):

$$S(t) = \left(S_0 - \frac{m g}{C_S} \right) \left(1 - \cos \sqrt{\frac{C_S}{m}} t \right) \cdot 1(t). \quad (38)$$

Скорость ударника на этом участке находится при помощи уравнения (39):

$$V_S(t) = \frac{dS}{dt} = \left(S_0 - \frac{mg}{c_S} \right) \sqrt{\frac{c_S}{m}} \sin \left(\sqrt{\frac{c_S}{m}} t \right) \cdot 1(t). \quad (39)$$

Уравнение (39) справедливо только на участке с нарастающей скоростью, до прихода пружины в свободное состояние. Этот момент соответствует максимальному значению синуса при $\pi/2$. Тогда время движения t_S на этом участке составит будет соответствовать выражению (40):

$$t_S = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{m}{c_S}}. \quad (40)$$

Конечная скорость разгона ударника соответствует выражению (41):

$$V_S = S_0 \sqrt{\frac{c_S}{m}} - g \sqrt{\frac{m}{c_S}}. \quad (41)$$

Тем не менее, даже при правильном расчете, подборе и настройке пружины в реальных рабочих средствах измерений в виду особенностей механизмов фиксации и сброса ударника, отсутствии компенсации влияния сжатого воздуха при сбросе, пружинный механизм не может обеспечить требования к точности скорости удара. Были проведены экспериментальные исследования разброса скорости ударника первичного преобразователя типа D путем записи осциллограмм ЭДС, возникающей на катушке индуктивности. Для иллюстрации разброса значений максимальной скорости ударника в точке контакта индентора с поверхностью в одной системе координат были построены графики каждого из десяти зафиксированных сигналов ЭДС (рисунок 20).

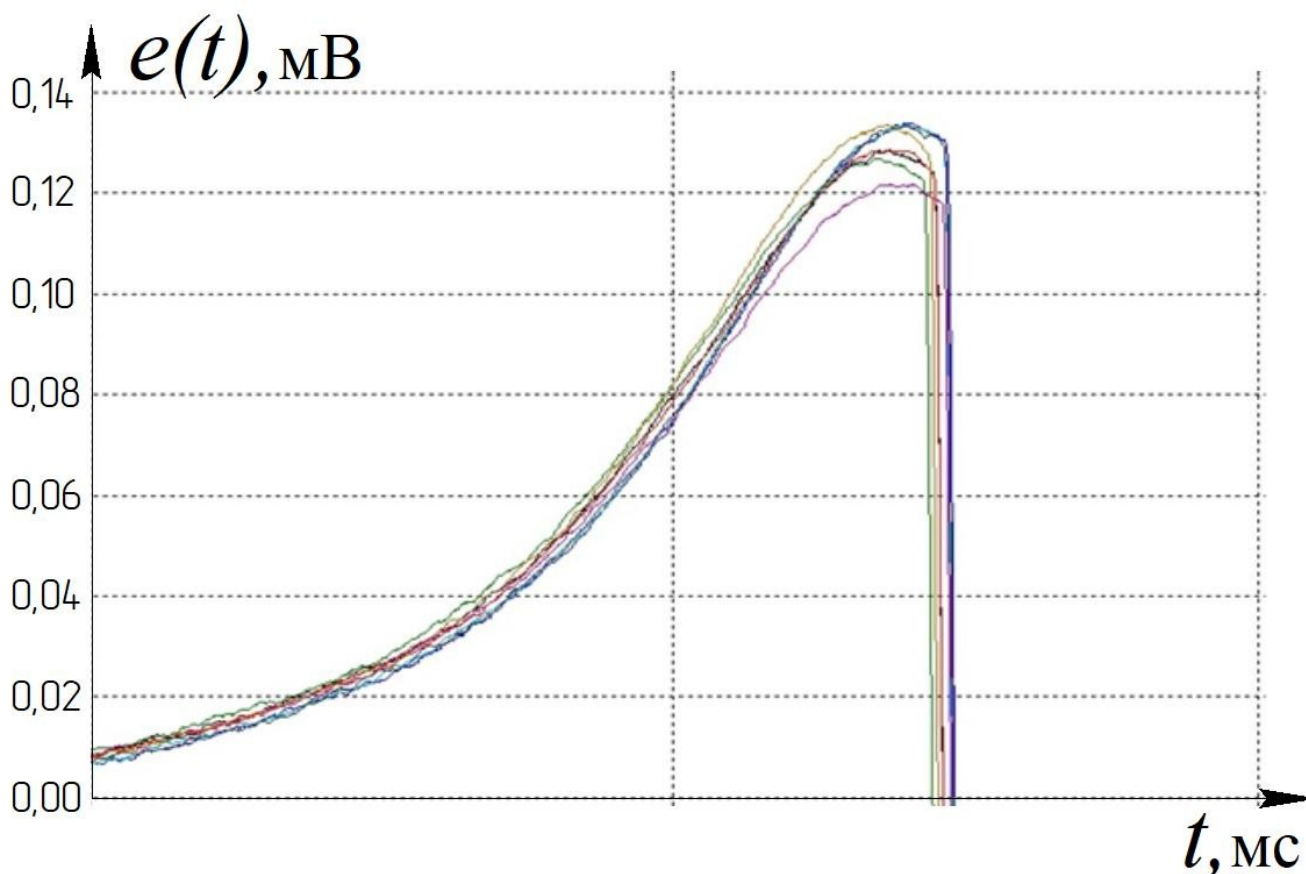


Рисунок 20 – Участок кривой ЭДС

Разброс максимального значения ЭДС, соответствующий разбросу скорости ударника, составляет $\pm 5\%$, что соответствует разбросу, нормированному для рабочих средств измерений твердости, но не удовлетворяет требованиям для эталонных установок.

Таким образом для разработки прототипа эталона 2-го разряда было предложено использовать гравитационный метод разгона ударника.

4.1.2 Анализ гравитационного метода разгона ударника

Скорость удара v_A в момент контакта с испытуемым образцом с отклонением, не превышающим предельно допустимого, обеспечивается гравитационным способом его разгона. При данном способе разгона ударник движется под воздействием гравитационного поля Земли. Использование данного способа обосновывается простотой конструкции узла сброса ударника, а уравнение движения имеет минимальное число аргументов. Скорость движения ударника описывается уравнением (42):

$$v_A = \sqrt{2\cos\varphi g H_1}, \quad (42)$$

где H_1 – высота сброса ударника, g – ускорение свободного падения, φ – угол отклонения оси трубки от вертикали.

Конструкция эталонной установки должна обеспечивать возможность регулировки высоты сброса ударника H_1 для обеспечения требуемой скорости удара v_A . Критическими параметрами узла блока удержания и сброса ударника является воспроизводимость условий сброса и постоянство высоты H_1 .

4.1.2.1 Оценка влияния высоты сброса

Для региона с ускорением свободного падения $g = 9.8155 \text{ м/с}^2$ номинальная высота сброса ударника H_1 составляет 214 мм.

Погрешность v_A от изменения высоты сброса ударника H_1 описывается выражением (43):

$$\Delta v_A(\Delta H_1) = \frac{\partial v_A}{\partial H_1} \Delta H_1 = \sqrt{\frac{g}{2H_1}} \cdot \Delta H_1. \quad (43)$$

Для обеспечения отклонения скорости не более 0,0025 м/с ΔH_1 не должно превышать 0,5 мм.

4.1.2.2 Оценка влияния угла наклона

Рассмотрим влияние позиционирования эталонной установки на задание скорости ударника. Если ось направляющей трубки установлена с отклонением от вертикальной оси, то вектор ускорения свободного падения действует на ударник пропорционально косинусу угла отклонения. Направляющая трубка устанавливается при помощи электронного уровня, погрешность измерений которого равна 0,1°. Погрешность задания скорости, вызванная погрешностью позиционирования эталонной установки определяется выражением (44):

$$\Delta v_A(\Delta\varphi) = \frac{\partial v_A}{\partial \varphi} = -\frac{1}{2} \sqrt{\frac{2}{\cos\varphi g H_1}} \sin\varphi g H_1 \cdot \Delta\varphi. \quad (44)$$

Таким образом, отклонение положение направляющей трубки относительно вертикальной оси на 0,1° будет приводить к систематической погрешности задания скорости ударника на -0,000179 м/с. К тому же будет увеличиваться

влияние коэффициента трения ударника о стенки направляющей трубки. Регулировка положения установки в пространстве обеспечивается за счет сферических регулируемых опор.

4.1.2.3 Оценка влияния ускорения свободного падения

Ускорение свободного падения является константой, значение которой зависит от высоты над уровнем моря и широты местоположения. Зависимость погрешности расчета скорости движения ударника от погрешности задания g определяется выражением (45):

$$\Delta v_A(\Delta g) = \frac{\partial v_A}{\partial g} \Delta g = \sqrt{\frac{H_1}{2g}} \cdot \Delta g. \quad (45)$$

Для обеспечения отклонения скорости не более 0,0025 м/с максимально допустимое отклонение Δg составляет 0,024 м/с².

Зависимость Δg и возможной погрешности $\Delta V_A(g)$ от высоты над уровнем моря и широты местоположения для основных городов РФ приведена в таблице 9. Таблица 9 – Зависимость отклонения Δg ускорения свободного падения и возможной погрешности $\Delta V_A(g)$ от высоты над уровнем моря и широты местоположения для некоторых городов РФ

Широта, град.	43,35	55,47	55,75	55,95	56,51	68,58
Город РФ	Сочи	Казань	Москва	СПб	Екатеринбург	Мурманск
$g, \text{ м/с}^2$	9,8057	9,8155	9,8155	9,8195	9,816	9,8255
$\Delta g, \text{ м/с}^2$	0,00953	0	0	0,00385	0,00077	0,01027
$\Delta V_A(g)$	0,001	0	0	0,0004	0,00008	0,0011

Таким образом, максимальное отклонение скорости, связанное с вариацией значения ускорения свободного падения $\Delta V_{A\text{макс}} < 0,0025$ м/с, однако требуется учет местной величины g при настройке прибора, воспроизводящего метод Либа.

Приведенные расчеты показывают, что гравитационный метод разгона ударника позволяет обеспечить требуемый разброс значений скорости падения ударника при задании высоты падения с точностью $\pm 0,5$ мм, отклонения

положения направляющей трубки относительно вертикальной оси менее $0,1^\circ$ и вариациях ускорения свободного падения g , характерных для территории РФ. Однако, для обеспечения задания номинального значения скорости падения ударника, необходимо реализовать ее независимое измерение.

4.1.3 Анализ методов измерения скорости ударника

Эталонные установки по шкалам Либа отличаются способом измерения скорости ударника. В настоящее время существуют два способа регистрации скорости падающего ударника: с использованием лазерного интерферометра [99] и катушек индуктивности [73, 94]. Разработаны так же системы для поэлементной калибровки [93] и поверки рабочих средств измерения твердости [80, 100].

Существующие системы измерения скорости падающего ударника на основе лазерного интерферометра, имеющего стабилизированную частоту, позволяют зафиксировать измерение скорости на протяжении всего процесса падения и отскока ударника, однако для большинства существующих решений конструкция ударника отличается от стандартизованного для обеспечения отражения луча интерферометра.

Для измерения скорости ударника использовался лазерный интерферометр, основанный на методике прямого оптического гетеродинамирования доплеровских сигналов - PDV (Photonic Doppler Velocimetry) [71]. Данная методика точна, проста в реализации и позволяет проследить за динамикой объекта без использования дополнительных отражающих элементов, таких как трипель-призмы. Использование оптоволоконных и широко распространенных телекоммуникационных элементов в такой системе позволяет создать компактный и недорогой прибор, пригодный для оснащения им метрологических организаций и лабораторий, проводящих калибровку или поверку динамических твердомеров, работающих по методу Либа, и соответствующих мер твердости.

Разработанная система проводит через оптоволоконный кабель, разветвитель 2 и циркулятор 5 излучение одночастотного непрерывного лазера 1 на длине волны 1550 нм к исследуемому объекту. Градиентная линза 7

закрепляется на конце оптоволоконного кабеля. Излучение лазера коллимируется и направляется на движущийся объект 8. Часть излучения лазера через волокно и волоконный смеситель 3 подается на детектор 4. Рассеянное объектом излучение испытывает доплеровский сдвиг частоты, после чего частично собирается той же линзой и передается на детектор 4. После чего, при совмещении двух сигналов с разными частотами на фотоприемнике формируются биения, регистрируемые осциллографом (рисунок 21).

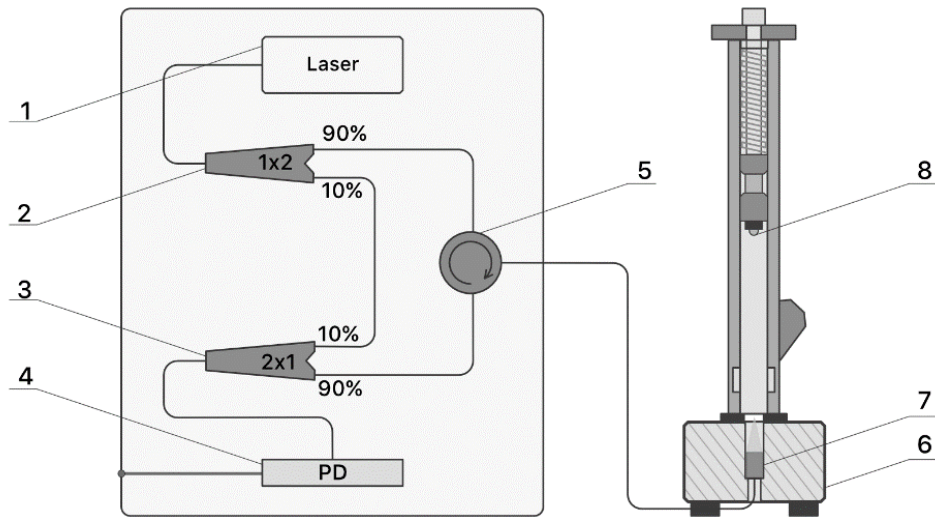


Рисунок 21 – Схема интерферометра для измерения скорости ударника: 1 - источник лазерного излучения, 2 - светоделитель с коэффициентом 1/9, 3 - оптоволоконный смеситель, 4 - фотодетектор, 5 - циркулятор, 6 - фиксатор линзы и твердомера, 7 - градиентная линза, 8 - ударник

Скорость объекта пропорциональна частоте доплеровского сигнала и описывается формулой (46):

$$V(t) = \frac{2cf_b(t)}{f_0}, \quad (46)$$

где f_0 – частота генерации лазера, c – скорость света.

Оконное Фурье преобразование применяется для восстановления процесса изменения частоты регистрируемого сигнала. Исходный сигнал разбивается на части с фиксированным шагом – длиной окна. После Фурье преобразования из набора частот в каждом окне с определяется максимальное значение с помощью аппроксимации функцией Гаусса, после чего из полученных точек выстраивается

динамика изменения скорости на протяжении всего процесса падения ударника.

Неопределенности измерения времени и частоты, связанные оконным Фурье преобразованием, описываются при помощи выражения (47) [67]:

$$\Delta f \Delta t \geq 1/4\pi, \quad (47)$$

где Δt – неопределенность измерения времени, Δf – неопределенность измерения частоты сигнала.

Требуемое значение неопределенности измерения скорости 0,0025 м/с, соответственно неопределенность частоты измерения сигнала должна составлять 3,23 кГц, соответственно неопределенность определения времени должна составлять $\Delta t = 25$ мкс. Уменьшение длины окна при разбиении сигнала приводит к увеличению погрешности измерения частоты, а увеличение уменьшит временное разрешение.

Исходя из требований методики можно рассчитать параметры системы регистрации. Лазер имеет длину волны 1550 нм, которой соответствует частота $f_0 = 1.936 \cdot 10^5$ ГГц, при скорости 3 м/с частота регистрируемых биений составляет величину $f_b = 3,87$ МГц. Следовательно, использование в разработанной системе фотоприемника HFBR-2316 с полосой пропускания 100 МГц, не накладывает ограничений на регистрируемые скорости. Минимальная частота дискретизации определяется по теореме Котельникова удвоением максимальной несущей частоты биений, в данном случае она составляет величину ~ 10 МГц. Используя значение необходимой неопределенности сигнала и учитывая тип выбранного окна можно рассчитать величину временного окна, она должна составлять 85 мкс [67]. Скорость объекта из-за силы тяжести за это время изменится на величину 0,00083 м/с, что в несколько раз меньше неопределенности измерений.

Система измерения скорости с катушкой индуктивности, являющаяся первичным эталоном ФРГ [91], реализована в эталонной установке, разработанной на базе твердомера Equotip 3 (рисунок 22). В системе используется катушка индуктивности и ударник с постоянным магнитом в корпусе, аналогичный средствам измерений швейцарского производителя Proseq, у

которых ударник с встроенным магнитом, пролетая сквозь катушку индуктивности при падении, наводит в ней ЭДС $e(t)$ амплитудой E_A , которая пропорциональна v_A . При отскоке, двигаясь через катушку вверх, ударник наводит в ней ЭДС $e(t)$ амплитудой E_R , которая пропорциональна v_R .



Рисунок 22 – Первичный эталон шкал твердости Либа в Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Германия

Принцип работы данной системы схож с принципом работы портативных измерительных преобразователей, что позволяет снизить неопределенность результатов измерений при передаче единицы твердости от эталонной установки к рабочему средству измерения. Для калибровки системы с одной катушкой индуктивности проводится поэлементная калибровка, в том числе и скорости удара. Такой подход не позволяет проводить периодический контроль скорости удара и контроль скорости в ходе измерений.

4.1.4 Анализ системы измерения скорости ударника на основе 2-х катушек индуктивности

В связи с проведенным анализом для обеспечения падения ударника с заданной скоростью предложена система, в которой измерение скорости удара v_A осуществляется с помощью конструкции, состоящей из двух катушек

индуктивности, расположенных друг от друга на расстоянии l , и постоянного магнита, встроенного в ударник (рисунок 23).

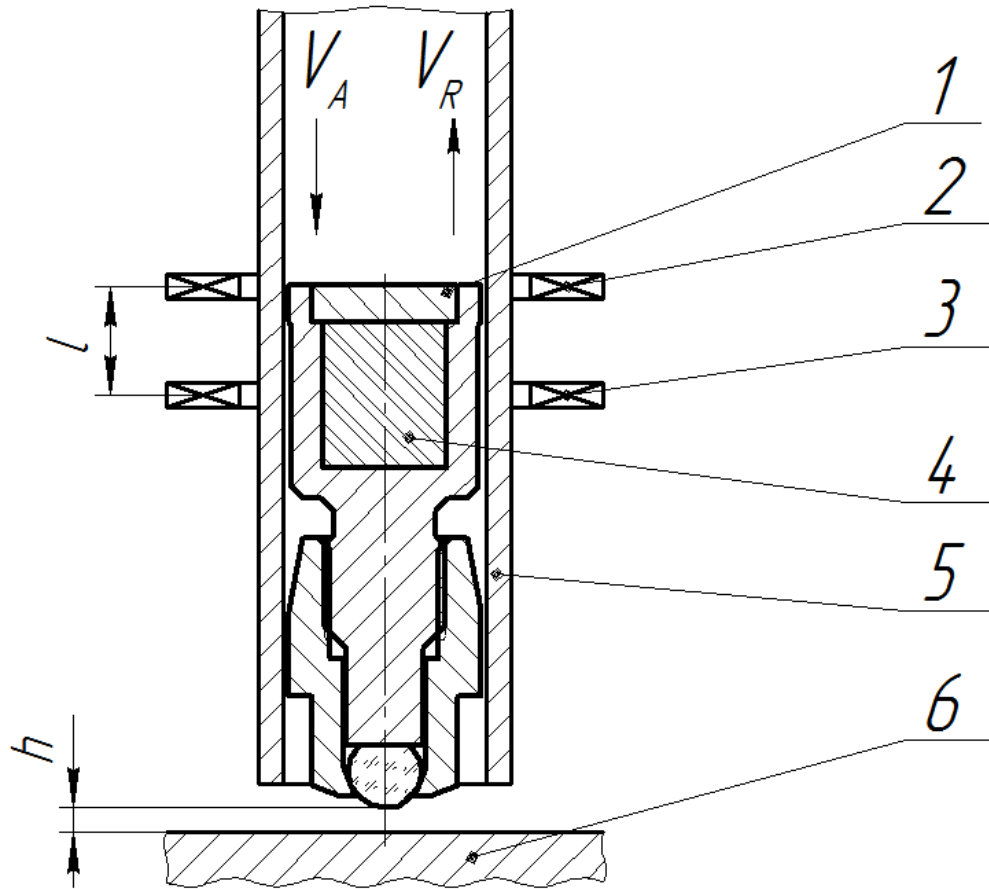


Рисунок 23 - Структура системы измерения v_A с двумя катушками индуктивности: 1 – ударник, 2 – катушка индуктивности L_2 , 3 – катушка индуктивности L_1 , 4 – постоянный магнит ударника, 5 – направляющая трубка, 6 – испытуемый образец

Движение ударника с магнитом со скоростью v_A через катушки индуктивности наводит в них ЭДС, пропорциональную скорости движения (рисунок 24).

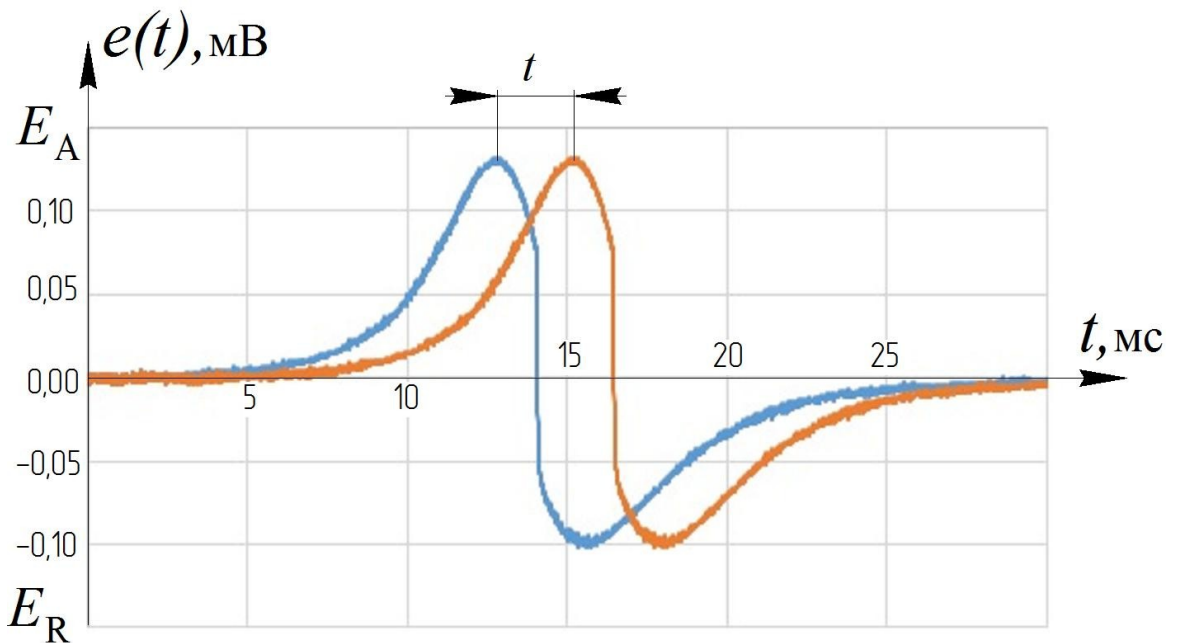


Рисунок 24 – Зависимость наведенной ЭДС на катушках индуктивности: E_A – ЭДС наведенная на катушке L1 до удара, E_{1R} – ЭДС наведенная на катушке L1 после удара, E_{2A} – ЭДС наведенная на катушке L2 до удара, E_{2R} – ЭДС наведенная на катушке L2 после удара, $t_{1,A}$ – время момента прохождения ударника через катушку L1 до удара, $t_{1,R}$ – время момента прохождения ударника через катушку L1 после удара, $t_{2,A}$ – время момента прохождения ударника через катушку L2 до удара, $t_{2,R}$ – время момента прохождения ударника через катушку L2 после удара

Измерив интервал времени $t = t_1 - t_2$ и принимая во внимание, что ударник движется равноускорено с ускорением свободного падения, можно записать выражение $l = v_A t + \frac{gt^2}{2}$, откуда получим выражение (48):

$$v_A = \frac{l}{t} - \frac{gt}{2}. \quad (48)$$

Измеряемой величиной является t , остальные аргументы, входящие в данное выражение, являются постоянными коэффициентами, задания которых необходимо определить с заданной точностью.

Расстояние между катушками l является характеристикой конструкции узла измерения скорости ударника. Влияние погрешности задания расстояния Δl на погрешность расчета скорости определяется выражением (49):

$$\Delta v_A(\Delta l) = \frac{\Delta l}{t}. \quad (49)$$

4.1.4.1 Оценка влияния погрешности измерения расстояния между катушками на измерение скорости

Произведем расчет времени пролета ударника через две катушки, приняв номинальное значение $l = 5$ мм.

После прохождения первой катушки со скоростью V_0 скорость ударника продолжает линейно нарастать до скорости V согласно формуле (50):

$$V = V_0 + gt. \quad (50)$$

Перемещение ударника на этом участке соответствует выражению (51):

$$l = \frac{V_0 + V}{2} t. \quad (51)$$

Время прохождения этого участка может быть найдено из решения квадратного уравнения (52-54):

$$l = \frac{V_0 + V}{2} t = \frac{V_0 + V_0 + gt}{2} t = V_0 t + \frac{gt^2}{2}; \quad (52)$$

$$gt^2 + 2V_0 t - 2l = 0; \quad (53)$$

$$t = \frac{1}{g} (\sqrt{V_0^2 + 2lg} - V_0). \quad (54)$$

Для заданных параметров:

$$t = \frac{1}{9,81908} (\sqrt{2,05^2 + 2 \cdot 0,005 \cdot 9,81908} - 2,05) = 2,425 \text{ [мс]}.$$

Следовательно, в соответствии с выражением (51) для обеспечения погрешности измерения скорости $\pm 0,0025$ м/с необходимо измерить расстояние между катушками с точностью ± 6 мкм.

Расстояние между обмотками задается дистанционной прокладкой требуемой толщины (рисунок 25). Катушки намотаны равномерно, в процессе намотки обеспечивается прилегание витка к витку, этим обеспечивается соответствие электромагнитного и геометрического центров катушек.

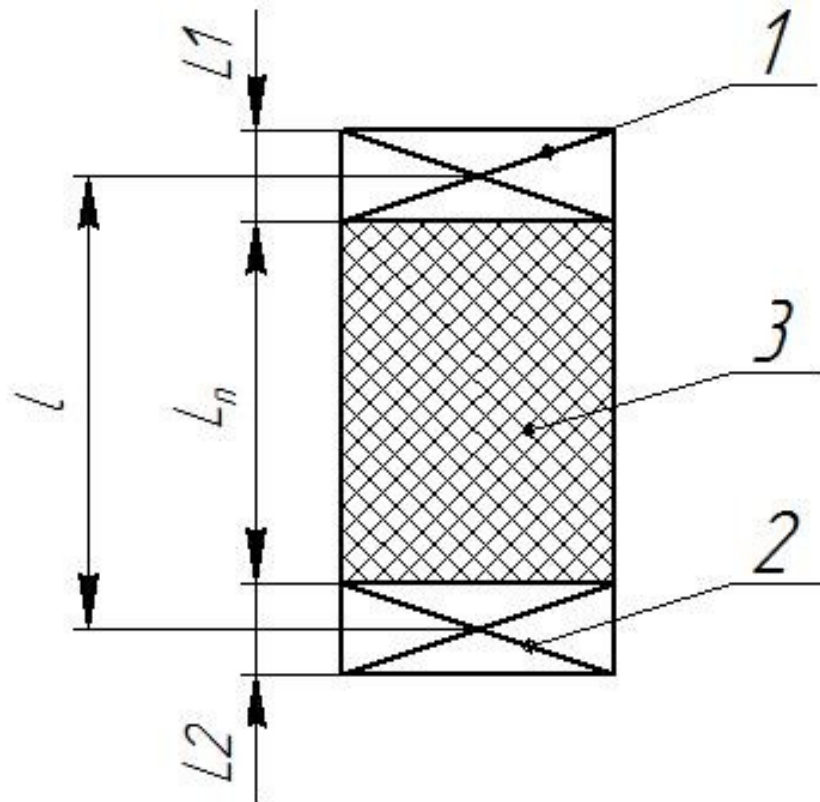


Рисунок 25 – Эскиз узла измерения скорости: 1 – катушка индуктивности L_2 , 2 – катушка индуктивности L_1 , 3 – дистанционная прокладка

Таким образом, расстояние между обмотками: $l = L_1/2 + L_2/2 + L_{п}$.

Погрешность измерения l складывается из погрешности измерения линейных размеров и определяется выражением (55):

$$\Delta l = \sqrt{\left(\frac{\Delta L_1}{2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta L_2}{2}\right)^2 + (\Delta L_{п})^2}. \quad (55)$$

Если линейные размеры катушек и прокладки измеряются средством измерений с погрешность не более ± 1 мкм, то погрешность определения коэффициента Δl составит ± 2 мкм, что вызовет появление систематической погрешности расчета скорости $\Delta v_A = \Delta v_R = \pm 0,00083$ м/с при значении $t=2,4 \times 10^{-3}$ с, соответствующему номинальному расстоянию между катушками $l=5$ мм.

4.1.4.2 Оценка необходимой точности измерения времени движения ударника между катушками

Продифференцировав по t выражение (48) получим следующую зависимость $\Delta v_A(\Delta t)$ (56):

$$\Delta v_A(\Delta t) = \left(\frac{g}{2} - \frac{l}{t^2} \right) \Delta t. \quad (56)$$

Отсюда при заданном значении $\Delta v_A = 0,0025$ м/с $\Delta t \approx 3$ мкс.

В таблице 10 приведены предельные расчетные отклонения параметров эталонной установки с гравитационным методом разгона ударника для обеспечения задания и измерения скорости падения ударника с максимальным отклонением $\Delta v_A = \pm 0,0025$ м/с.

В дальнейшем будем исходить из того, что, неопределенности значений высоты сброса ударника ΔH_1 , расстояния между катушками Δl и времени пролета между катушками Δt носят случайный характер и не зависят друг от друга. Следовательно, неопределенность по типу А значения скорости падения ударника рассчитывается через геометрическую сумму указанных параметров [75-77]. Остальные источники неопределенности (значение g , угол наклона направляющей, сопротивление воздуха и т.п.) носят систематический характер, могут быть оценены как неопределенности по типу В и устранены путем введения соответствующей поправки путем прямого измерения скорости движения ударника.

Таблица 10 – 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

Продолжение таблицы 10

Параметр	Номинальное значение	Требуемое предельное отклонение	Относит. предельное откл., %
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 *	
$\Delta v_{A\Sigma} = \sqrt{\sum \left(\frac{\Delta v_A}{v_A}\right)^2}$			0,12%

*Максимальная вариация относительно СПб в Мурманске 0,01027 м/с²

Расчетная величина предельного относительного отклонения скорости ударника при заданном отклонении 0,0025 м/с для номинального значения скорости 2,05 м/с равна 0,12 %. Данная величина достигается при обеспечении следующих значений неопределенностей измеряемых величин и контролируемых параметров:

$$\Delta H_1 = \pm 0,1 \text{ мм}; \Delta l = \pm 3 \text{ мкм}; \Delta t = \pm 2 \text{ мкс.}$$

Исходя из проведенного в предыдущей главе анализа был изготовлен экспериментальный образец эталонной установки 2-го разряда (рисунок 26).

4.2 Конструкция экспериментального образца эталонной установки 2-го разряда

4.2.1 Структурная схема и принципы работы

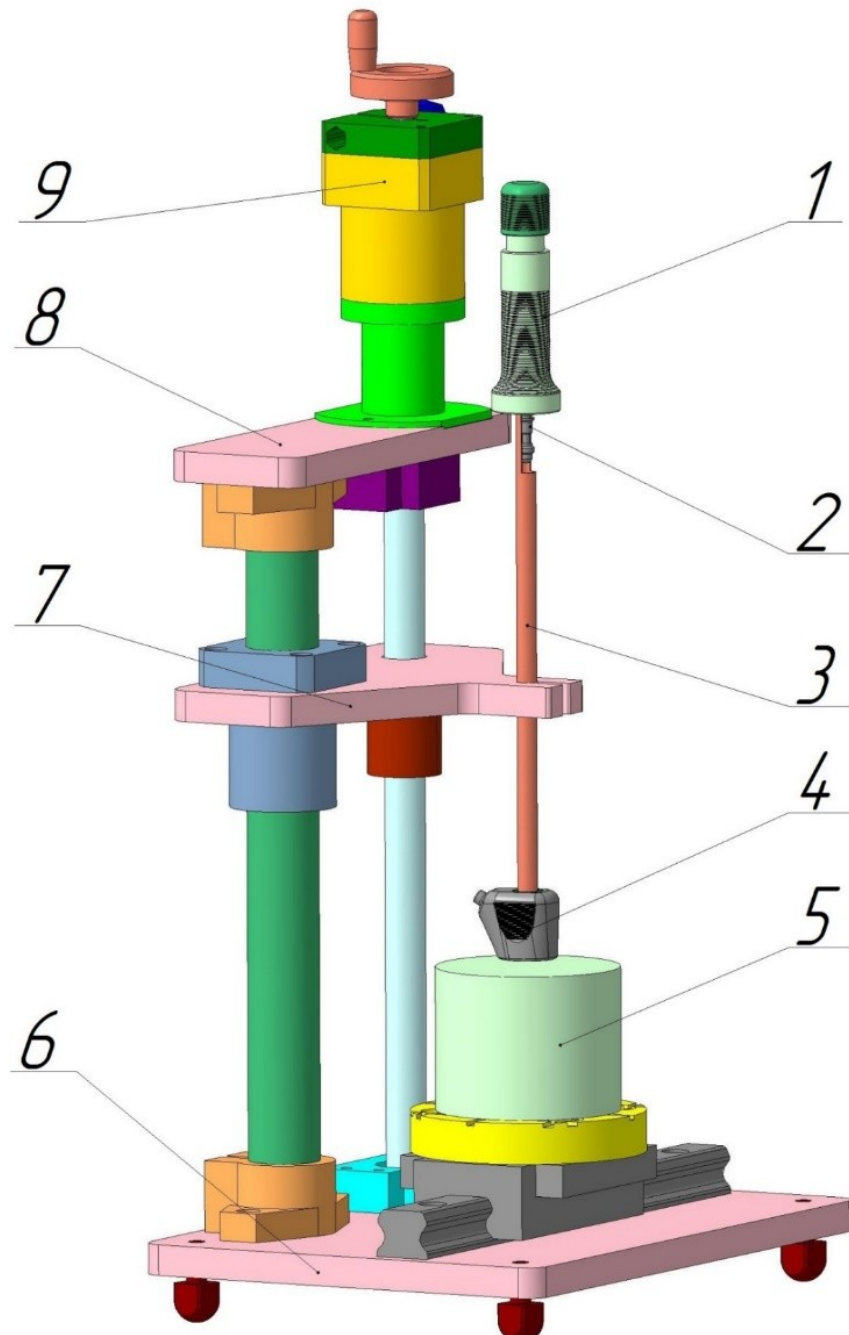


Рисунок 26 – 3D модель экспериментального образца эталонной установки 2-го разряда: 1 – блок удержания и сброса ударника, 2 – ударник, 3 – направляющая трубка, 4 – блок измерения скорости, 5 – испытуемый образец (ИО), 6 – нижняя пластина (основание), 7 – средняя пластина, 8 – верхняя пластина, 9 - блок вращения ШВП

Установка представляет собой разнесенные по высоте параллельные алюминиевые пластины 6, 7 и 8, которые соединены между собой стальным полированным валом диаметром 35 мм и винтом ШВП 9.

Нижняя пластина (основание) 6 имеет четыре регулируемые по высоте ножки для обеспечения строго горизонтальной установки ИО 5 на поверхность измерительного стола. Также на основании установлена рельсовая направляющая с линейным модулем, на котором закреплён измерительный стол. Таким образом обеспечивается возможность перемещения ИО 5 относительно направляющей трубки 3 при проведении серии измерений.

В случае изменения толщины ИО 5, положение направляющей трубки 3 относительно ИО 5 и соответственно высота сброса ударника могут регулироваться двумя способами:

1. При помощи перемещения средней пластины 7 вместе с жестко закрепленной в ней направляющей трубкой 3 за счет вращения винта ШВП 9. Винт ШВП имеет ручной привод, и блок вращения ШВП 9 закреплен на верхней пластине 8. Блок вращения ШВП включает в себя переходную муфту, планетарный редуктор для уменьшения шага перемещения средней пластины и рукоятку. Также в блоке вращения ШВП предусмотрен затягивающий винт, который обжимает вал рукоятки, для предотвращения случайного перемещения средней пластины.

2. При помощи перемещения направляющей трубки 3 внутри средней пластины 7. Для того, чтобы жестко закрепить направляющую трубку в средней пластине, в ней также предусмотрен затягивающий винт.

Для уменьшения воздействия силы сопротивления воздуха направляющая трубка 3 устанавливается относительно ИО 5 таким образом, чтобы между поверхностью ИО 5 и концом трубки оставался воздушный зазор. Зазор выставляется следующим образом: на поверхность ИО 5 помещается мера известной толщины и, ослабив зажимной винт в средней пластине 7, опускается направляющая трубка 3 до касания с мерой. В нашем случае использована мера 5 мм. Величина зазора может варьироваться путем выбора толщины меры для

введения поправки высоты падения ударника и устранения систематических погрешностей. Кроме того, в конструкции ударника 2 предусмотрены продольные пазы, которые также помогают уменьшить воздействие силы трения, возникающей между стенками ударника и направляющей трубки 3.

4.2.2 Блок удержания и сброса ударника

В верхней части направляющей трубки расположен блок удержания и сброса ударника (рисунок 27). Ударник, используемый в эталонной установке несколько отличается от ударников, применяемых в рабочих средствах измерений (твердомерах), тем, что у него отсутствует хвостовик, за который должна зацепляться цанга. Связано это с тем, что ввиду отсутствия разгоняющей пружины (ударник разгоняется только под воздействием силы тяжести), существенно возрастает вероятность несбрасывания ударника или нарушения траектории его полета из-за того, что хвостовик может зацепиться за одну из губок цанги. В связи с этим была разработана система, включающая в себя 2 неодимовых магнита и пару возвратных пружин. Ударник помещается в специальный паз в направляющей трубке и примагничивается к одному из магнитов, входящих в блок удержания и сброса. Затем весь блок перемещается вдоль оси направляющей трубки вниз до точки сброса ударника. При нажатии и спуске кнопки сброса магнит, удерживающий ударник, начинает перемещаться внутри блока вверх под воздействием второго более мощного магнита до того момента, пока ударник, упирающийся в ограничитель, не выйдет из контакта с ним.

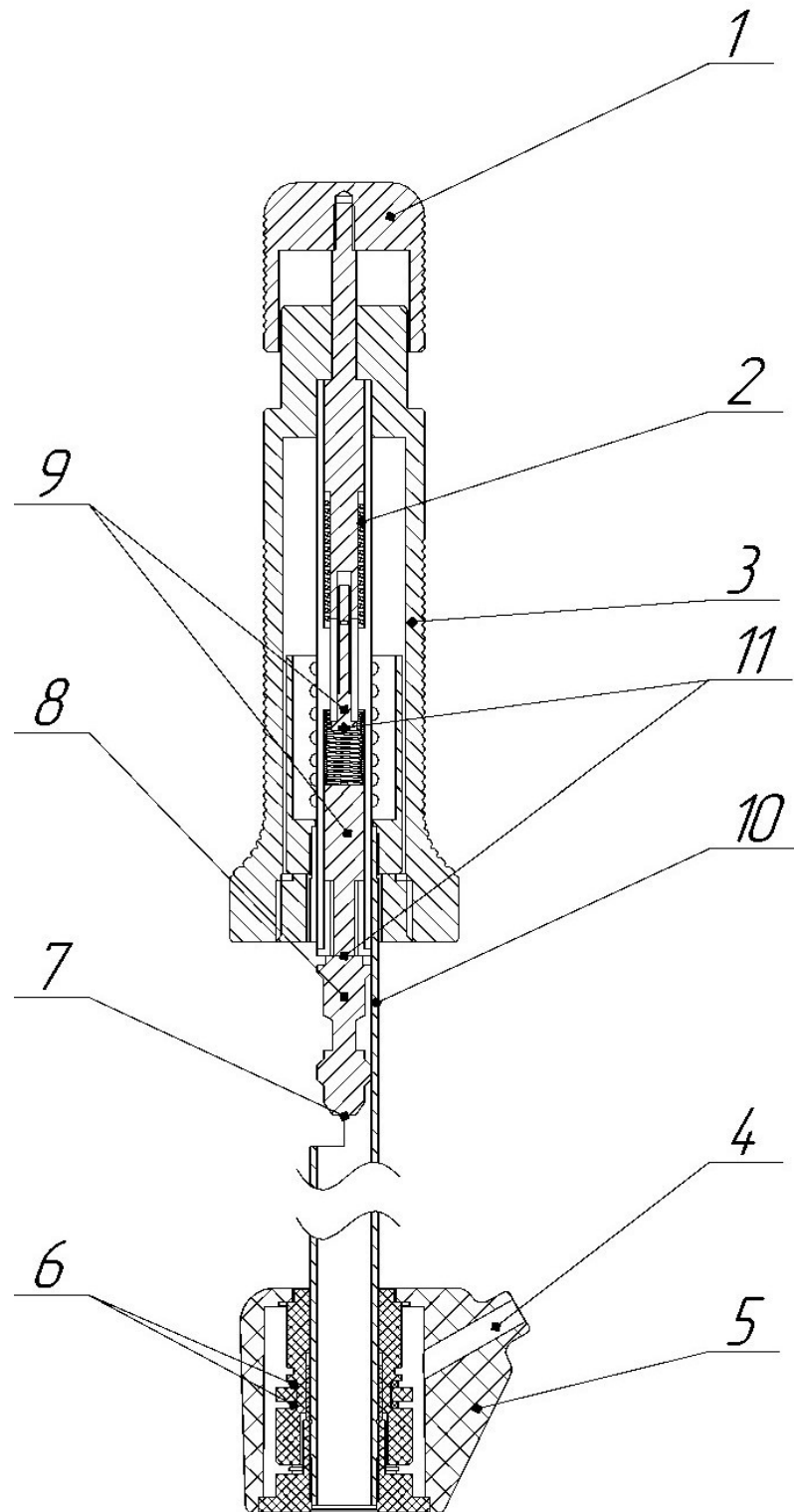


Рисунок 27 – Схема блока удержания и сброса ударника с гравитационным разгоном, где 1 - кнопка спуска; 2 - взводящая пружина; 3 – взводящая трубка; 4 – канал для соединительного кабеля; 5 – корпус катушки индуктивности; 6 – катушки индуктивности; 7 – сферический наконечник (индентор); 8 – ударник; 9 – устройство спуска; 10 - направляющая трубка; 11 - магниты

На нижней части направляющей трубки находится блок измерения скорости. Он представляет собой каркас, на который намотаны две катушки индуктивности с одинаковыми размерами: толщина провода 0,032 мм, внутренний диаметр 12 мм, внешний диаметр 17 мм, длина намотки 0,5 мм. Катушки разнесены между собой на определенное расстояние при помощи разделительной шайбы. Расстояние между катушками $l = 5$ мм обеспечено с абсолютной погрешностью не более ± 3 мкм.

Регулировка высоты сброса ударника производится путем вращения корпуса катушки относительно направляющей трубки по резьбе с шагом 0,5 мм. На катушке установлен лимб с делениями 1° , обеспечивающий позиционирование катушки с шагом ~ 10 мкм по вертикали. После установки катушка жестко закрепляется на направляющей трубке при помощи двух установочных винтов.

4.2.3 Расчет поправки значения скорости удара от расстояния до поверхности образца

При измерении скорости ударника с помощью 2-х катушек индуктивности [63] необходимо учесть расстояние между координатой, в которой измеряется скорость и точкой удара о поверхность ИО. При этом изменение скорости не должно превышать заданное значение, либо это изменение должно быть учтено в качестве поправки.

Как было описано в разделе 4.1.4 Определение скорости производится путем измерения временной задержки t между сигналами ЭДС 2-х катушек (рисунок 28) по формуле (48).

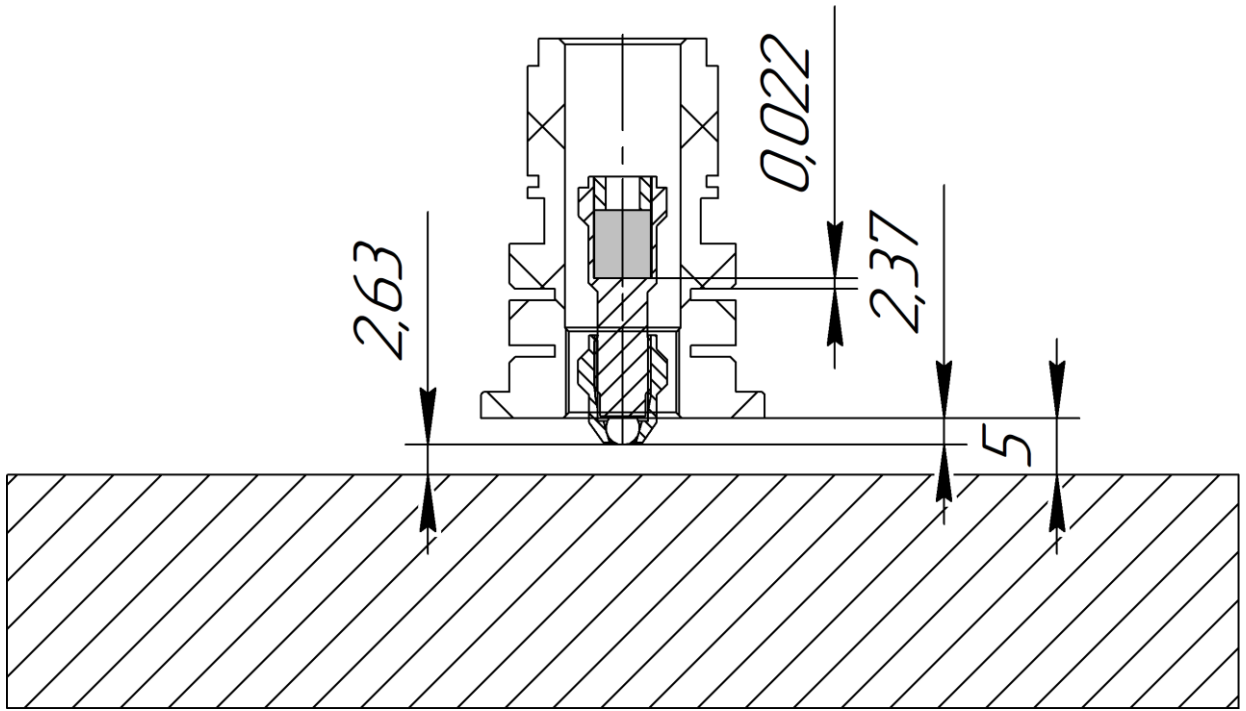


Рисунок 28 – Эскиз взаимного расположения катушки индуктивности и ударника относительно поверхности ИО в момент измерения скорости

Если время t измеряется по пикам сигналов ЭДС 2-х катушек, то расстояние от края магнита до края катушки, на котором ЭДС достигает максимального значения, определяется по формуле (57) [56]:

$$\Delta l_1 = 0,72 \frac{d_k}{d_m} - 1,75, \quad (57)$$

где d_m – диаметр магнита, d_k – внутренний диаметр катушки индуктивности.

На рисунке 28 приведено изображение катушки с ударником в точке, в которой вычисляется скорость. Для фактических размеров узлов разработанной установки это значение составляет 22 мкм. Тогда при зазоре между корпусом катушки и образцом 5 мм, пролет ударника после координаты измерения скорости будет составлять 2,63 мм. В соответствии с выражением (54) время пролета равно 1,26 мс, что приведет к приращению скорости 0,0124 м/с, которое необходимо учесть в виде поправки к измеряемой скорости.

Наиболее эффективным способом определения времени пролета от точки измерения скорости до касания с поверхностью представляется его прямое измерение по осциллограмме удара.

4.3 Выводы по главе 4

1. Проанализированы существующие конструкции эталонных установок и рабочих средств измерений твердости по шкалам Либа;
2. Проведен анализ и сформулированы требования к основным конструктивным элементам и узлам прототипа эталонной установки 2-го разряда;
3. Предложена конструкция и изготовлен экспериментальный образец эталонной установки 2-го разряда с двухкатушечной системой измерения скорости падения ударника.

ГЛАВА 5 ИССЛЕДОВАНИЕ И АНАЛИЗ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РАЗРАБОТАННОГО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОБРАЗЦА ЭТАЛОННОЙ УСТАНОВКИ 2-ГО РАЗРЯДА

5.1 Теоретический анализ и экспериментальные исследования технических характеристик экспериментального образца эталонной установки 2-го разряда

5.1.1 Оценка влияния температуры на высоту сброса

Изменение высоты сброса может произойти в следствии изменения температуры окружающей среды. В частности, при изменении температуры металлы меняют свои линейные размеры пропорционально температурному коэффициенту линейного расширения (ТКЛР) – физической постоянной, являющейся характеристикой материала.

С практической точки зрения интерес представляет не абсолютное значение температуры, а величина ее отклонения.

Согласно [77] температура окружающей среды при использовании эталона находится в интервале $(23 \pm 5) \text{ C}^0$.

Линейные размеры конструктивных элементов эталонной установки и ТКЛР α для их материалов приведены в таблице 11.

Таблица 11 – Линейные размеры конструктивных элементов эталонной установки и ТКЛР α для их материалов

Элемент	Материал	ТКЛР α , $\times 10^{-6} \text{ 1/C}$	Размер элемента, мм
Опорная колонна	95X18	11,8	270
Трубка	Д16	22,9	150
Рельс	95X18	11,8	25
Стол	Д16	22,9	20
Мера	ШХ15	11,9	60
Стержень	ЛС59-1	20,6	85
Упор	Полиамид	110	10

Изменение высоты сброса ударника при изменении температуры ΔT_{C} на ± 5 °C соответствует выражению (58):

$$\Delta H_1 = (\sum l_i \alpha_i) \Delta T_{\text{C}}. \quad (58)$$

$\Delta H_1 = 109,4 \cdot 10^{-6}$ м, что в свою очередь приведет к систематической погрешности задания скорости ударника $\pm 0,000224$ м/с.

5.1.2 Экспериментальные исследования параметров задания и измерения скорости удара

5.1.2.1 Исследование метрологических характеристик 2-х катушечного измерителя скорости удара

Для оценки скорости удара двухкатушечным преобразователем необходимо контролировать время прохождения ударника между двумя катушками и знать расстояние между центрами катушек с точностью до 3 мкм. Для оценки времени прохождения ударника между катушками использовался осциллограф Tektronix MDO3012 (полоса пропускания 2,5 ГГц). Для определения расстояния между катушками производились эксперименты с применением двухкатушечного преобразователя и интерферометра. В ходе серии экспериментов измеряя время осциллографом и фиксируя скорость падения ударника было рассчитано действительное расстояние между центрами катушек, которое составило $(4,680 \pm 0,002)$ мм.

5.1.2.2 Исследование неопределенности значений скорости удара

Для оценки неопределенности значений скорости удара двухкатушечным преобразователем была проведена серия из 25 экспериментов. Далее оценивались неопределенности результатов измерений по типу А, типу В, суммарная и расширенная неопределенности результатов измерений.

При проведении эксперимента использовался осциллограф с полосой пропускания 2 ГГц. Скорость записи данных была установлена 20 MS/c (мегаобразов в секунду). Следовательно дискретность данных по времени составила 50 нс, что достаточно для измерения временных интервалов с

разрешением 0,1 мкс.

Экспериментальные данные измерения времени пролета, расчетные значения скорости по формуле (59), а также среднее значение скорости и стандартное отклонение приведены в таблице 12.

$$V = \frac{l}{t_{cp}}, \quad (59)$$

где l - действительное расстояние между центрами катушек, $l = 4,68 \cdot 10^{-3}$ м, t – экспериментальные данные измерения времени пролета, $t_{cp} = 2,44383 \cdot 10^{-3}$ с.

Таблица 12 – Экспериментальные данные измерения времени и скорости пролета для двухкатушечного преобразователя

№ изм.	Время, с	Скорость, м/с
1	0,00244	2,04831
2	0,00244	2,04873
3	0,00244	2,04894
4	0,00244	2,04904
5	0,00244	2,04912
6	0,00244	2,04921
7	0,00243	2,04943
8	0,00243	2,04956
9	0,00243	2,04969
10	0,00243	2,05102
11	0,00243	2,05108
12	0,00243	2,05114
13	0,00243	2,05125
14	0,00243	2,05131
15	0,00243	2,05141
16	0,00243	2,05142
17	0,00243	2,05159
18	0,00243	2,05168
19	0,00243	2,05167
20	0,00243	2,05183
21	0,00243	2,05193
22	0,00243	2,05202
23	0,00243	2,05216
24	0,00243	2,05218
25	0,00244	2,04952

Продолжение таблицы 12

№ изм.	Время, с	Скорость, м/с
Среднее значение	0,002438	2,05061
СКО	$1,48289 \cdot 10^{-6}$	0,00127

Составляющая неопределенности результатов измерений скорости по типу А оценивалась как стандартное отклонение серии измерений скорости двухкатушечным преобразователем и составила:

$$U_A = 1,27 \cdot 10^{-3} \text{ м/с.}$$

Составляющая неопределенности результатов измерений по типу В оценивалась из двух составляющих, описывающих отклонения, связанные с инструментальной погрешностью осциллографа при определении времени и погрешности определения длины осциллографом и интерферометром, $\Delta V_0 = 0,0012 \text{ м/с}$ и $\Delta t_0 = 0,1 \cdot 10^{-6} \text{ с}$ соответственно. Для выражения (59) были рассчитаны частные производные скорости по расстоянию (60) и времени (61) соответственно:

$$\Delta V(\Delta l) = \frac{\partial V}{\partial l} \Delta l, \quad \Delta V(\Delta l) = \frac{\Delta l(\Delta V_0, \Delta t_0)}{t}; \quad (60)$$

$$\Delta V(\Delta t) = \frac{\partial V}{\partial t} \Delta t, \quad \Delta V(\Delta t) = l \frac{\Delta t}{t^2}, \quad (61)$$

где Δt – стандартное отклонение для измерения времени пролета, $\Delta t = 1,4828972 \cdot 10^{-6} \text{ с}$;

Δl – неопределенность измерения расстояния между центрами катушек, рассчитанная по формуле (62) из двух составляющих – неопределенности измерения скорости интерферометром и неопределенности измерения времени осциллографом, $\Delta l(\Delta V_0, \Delta t_0) = 2,9532 \cdot 10^{-6} \text{ м}$, найденная через частные производные расстояния по скорости (63) и времени (64) соответственно:

$$l = Vt; \quad (62)$$

$$\Delta l(\Delta V_0) = \frac{\partial l}{\partial V} \Delta V_0, \quad \Delta l(\Delta V_0) = t \Delta V_0; \quad (63)$$

$$\Delta l(\Delta t_0) = \frac{\partial l}{\partial t} \Delta t_0, \Delta l(\Delta t_0) = V \Delta t_0. \quad (64)$$

Тогда

$$\Delta l(\Delta V_0) = 2,44383 \cdot 10^{-3} \cdot 0,0012 = 2,928 \cdot 10^{-6} \text{ [м];}$$

$$\Delta l(\Delta t_0) = 2,0506 \cdot 0,1 \cdot 10^{-6} = 0,2051 \cdot 10^{-6} \text{ [м].}$$

Далее

$$\Delta l(\Delta V_0, \Delta t_0) = \sqrt{(\Delta l(\Delta V_0))^2 + (\Delta l(\Delta t_0))^2} = 2,9532 \cdot 10^{-6} \text{ [м].}$$

Тогда

$$\Delta V(\Delta l) = \frac{2,9532 \cdot 10^{-6}}{2,44383 \cdot 10^{-3}} = 1,2037 \cdot 10^{-6} \text{ [м/с];}$$

$$\Delta V(\Delta t) = 4,68 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1,4828972 \cdot 10^{-6}}{(2,44383 \cdot 10^{-3})^2} = 1,1620 \cdot 10^{-3} \text{ [м/с].}$$

Суммарная неопределенность результатов измерений оценивалась при помощи выражения (65):

$$\Delta V_{\Sigma} = \sqrt{\Delta V^2(\Delta l) + \Delta V^2(\Delta t)}. \quad (65)$$

И составила:

$$\Delta V_{\Sigma} = \sqrt{(1,2037 \cdot 10^{-6})^2 + (1,1620 \cdot 10^{-3})^2} = \sqrt{1,3502 \cdot 10^{-6}} = 0,0012 \text{ [м/с].}$$

Расширенная неопределенность результатов измерений с коэффициентом охвата $k = 2$ и доверительной вероятностью $P = 0,95$ рассчитывалась по формуле (66):

$$U_{V_a} = k \cdot \Delta V_{\Sigma}; \quad (66)$$

$$U_{V_a} = 2 \cdot 0,0012 = 0,0024 \text{ [м/с],}$$

и составила $U_{V_a} = 0,0024$ м/с, что соответствует требованиям стандарта для эталонных установок 2-го разряда.

5.1.3 Поэлементная калибровка

5.1.3.1 Определение номинального значения и оценка неопределенности массы ударника

Согласно стандарту, масса ударника должна составлять $(5,45 \pm 0,03)$ г. Определение массы ударника производилось с помощью электронных весов лабораторных ВЛ-320С, обеспечивающих точность $\pm 0,5$ мг. Результаты оценки

массы ударника представлены в таблице 13.

Таблица 13 – Измеренные значения массы ударника

№ изм.	Результат, г.
1	5,42
2	5,43
3	5,42
4	5,42
5	5,42
6	5,42
7	5,42
8	5,43
9	5,42
10	5,43
11	5,42
12	5,43
13	5,42
14	5,43
15	5,42
16	5,43
17	5,42
18	5,42
19	5,42
20	5,43
21	5,44
22	5,43
23	5,43
24	5,42
25	5,43
Среднее значение, г.	5,42
СКО	0,0059

Составляющая неопределенности результатов измерений по типу А оценивалась как стандартное отклонение серии измерений массы на весах и составила:

$$U_A = 5,86 \cdot 10^{-3} \text{ г.}$$

Неопределенность результатов измерений по типу В определена исходя из значений погрешности весов в соответствии с описанием типа:

$$U_B = \frac{0,01}{\sqrt{3}} \text{ г.}$$

Суммарная неопределенность результатов измерений оценивалась по формуле (67):

$$U_{\Sigma} = \sqrt{U_A^2 + U_B^2}. \quad (67)$$

И составила:

$$U_{\Sigma} = \sqrt{(5,86 \cdot 10^{-3})^2 + \left(\frac{0,01}{\sqrt{3}}\right)^2} = 0,008 \text{ [г]}.$$

Расширенная неопределенность результатов измерений с коэффициентом охвата $k = 2$ и доверительной вероятностью $P = 0,95$ рассчитывалась по формуле (68):

$$U_m = k \cdot U_{\Sigma}; \quad (68)$$

$$U_m = 2 \cdot 0,008 = 0,016 \text{ [г]},$$

и составила $U_m = 0,016$ г, что соответствует требовани стандарта для эталонных установок 2-го разряда.

5.1.3.2 Определение номинального значения и оценка неопределенности радиуса сферического наконечника

Согласно стандарту радиус сферического наконечника ударника должен составлять $(1,500 \pm 0,003)$ мм. Определение радиуса наконечника ударника производилось с помощью микрометра Shut Electronic Outside Micrometer с разрешением 0,001 мм в серии из 25 измерений. Результаты оценки массы ударника представлены в таблице 14.

Таблица 14 – Измеренные значения радиуса сферического наконечника ударника

№ изм.	Результат, мм
1	1,501
2	1,499
3	1,498
4	1,498
5	1,499
6	1,498
7	1,499
8	1,502

Продолжение таблицы 14

№ изм.	Результат, мм
9	1,499
10	1,498
11	1,502
12	1,498
13	1,499
14	1,498
15	1,499
16	1,498
17	1,498
18	1,500
19	1,498
20	1,498
21	1,499
22	1,498
23	1,498
24	1,498
25	1,499
Среднее значение, мм	1,498
СКО	0,001

Составляющая неопределенности результатов измерений по типу А оценивалась как стандартное отклонение серии измерений диаметра шара микрометром и составила:

$$U_A = 1 \cdot 10^{-3} \text{ мм.}$$

Неопределенность результатов измерений по типу В оценивалась как приборная погрешность микрометра, взятая из технической документации, и составила:

$$U_B = \frac{0,002}{\sqrt{3}} \text{ мм.}$$

Суммарная неопределенность результатов измерений оценивалась по формуле (69):

$$U_{\Sigma} = \sqrt{U_A^2 + \frac{U_B^2}{3}}. \quad (69)$$

И составила:

$$U_{\Sigma} = \sqrt{(1 \cdot 10^{-3})^2 + \left(\frac{0,002}{\sqrt{3}}\right)^2} = 0,0016 \text{ [мм]}.$$

Расширенная неопределенность результатов измерений с коэффициентом охвата $k = 2$ и доверительной вероятностью $P = 0,95$ рассчитывалась по формуле (70):

$$U_R = k \cdot U_{\Sigma}; \quad (70)$$

$$U_R = 2 \cdot 0,0016 = 0,0032 \text{ [мм]},$$

и составила $U_R = 0,0032$ мм, что соответствует требованиям стандарта для эталонных установок 2-го разряда.

5.1.3.3 Определение номинального значения и оценка неопределенности скорости удара

Для исследования параметров ударного преобразователя была разработана конструкция, позволяющая совместить оптоволоконный интерферометр с ударным преобразователем. Градиентная линза в данной системе закрепляется снизу, таким образом, чтобы излучение лазера направлялось на сферический наконечник ударника, а отраженное излучение собиралось линзой на всем пути движения ударника. Для оценки номинального значения скорости падения ударника была проведена серия экспериментов, результаты которых представлены в таблице 15. Источником излучения являлся полупроводниковый одночастотный лазер с длиной волны 1550 нм и мощностью до 200 мВт. Регистрация осуществлялась фотоприемником HFBR-2316 с полосой регистрации 100 МГц. Полученные на фотоприемнике сигналы направлялись на осциллограф Tektronix MDO3012 (полоса пропускания 2,5 ГГц). При измерении скорости частота дискретизация сигнала составляла 100 МГц. На рисунке 29 приведен график скорости ударника эталонной установки. Прямолинейный участок соответствует свободному падению ударника.

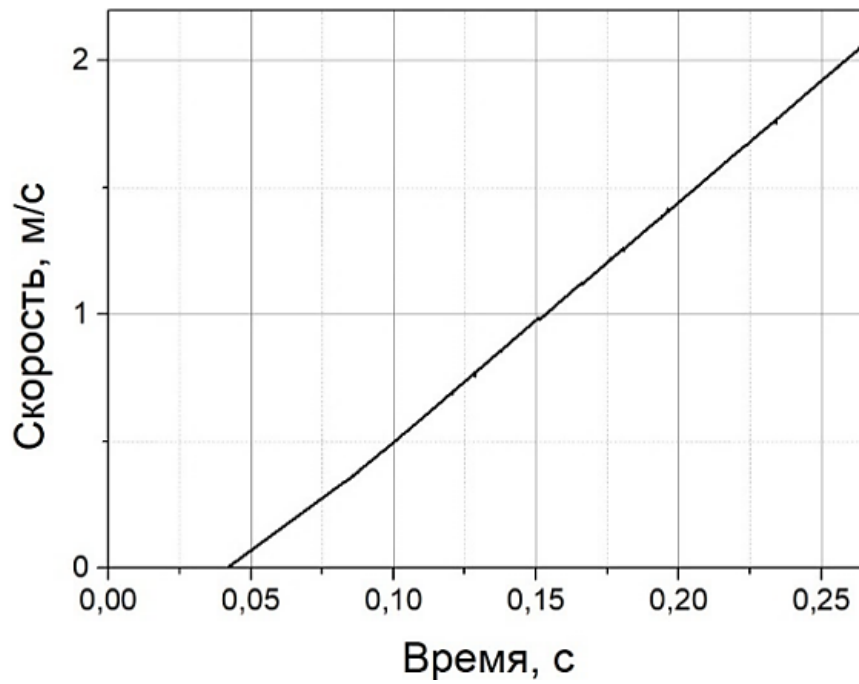


Рисунок 29 – Профиль скорости ударника

Таблица 15 – Измеренные значения скорости удара

№	Результат, м/с
1	2,0489
2	2,0492
3	2,0489
4	2,0492
5	2,0491
6	2,0489
7	2,0490
8	2,0491
9	2,0492
10	2,0490
11	2,0489
12	2,0490
13	2,0489
14	2,0490
15	2,0491
16	2,0489
17	2,0490
18	2,0489
19	2,0488
20	2,0492
21	2,0489
22	2,0490
23	2,0491
24	2,0490

Продолжение таблицы 15

№	Результат, м/с
25	2,0489
Среднее значение, м/с	2,0490
СКО	0,000117

Измеренная скорость составляет $(2,049 \pm 0,0011)$ м/с при временном разрешении 0,19 мс, что соответствует требованиям стандарта для эталонных установок 2-го разряда.

5.2. Исследование метрологических характеристик экспериментального образца эталонной установки на соответствие требованиям к эталонной установке 2-го разряда при калибровке по мерам твердости 1-го разряда

5.2.1 Выбор эталонных мер твердости 1-го разряда

Для исследования показателей повторяемости экспериментального образца эталонной установки 2-го разряда был закуплен комплект эталонных мер твердости 1-го разряда по шкале Либа D. Калибровка мер была проведена в РТВ (Physikalisch-Technische Bundesanstalt) в соответствии с DIN 50156-3 с помощью первичного эталона HN-01-D. Твердость по Либу оценивалась на одной из сторон (стороне А по протоколу калибровки) эталонной меры твердости в HLD. Номера калибровочных сертификатов 50101 РТВ 15, 50102 РТВ 15, 50103 РТВ 15 (Приложение А). Метрологические характеристики мер твердости указаны в таблице 16 (V_H = коэффициент вариации).

Таблица 16 – Метрологические характеристики эталонных мер твердости

№ изм	Твердость образцовой меры твердости, HLD.		
	491,5	608	770
1	497,8	608,2	772,2
2	489,2	607,1	769,7
3	487,6	608,7	773,3

Продолжение таблицы 16

№ изм	Твердость образцовой меры твердости, HLD.		
	491,5	608	770
4	492,9	607,2	771,6
5	497,6	610,0	769,6
6	493,7	609,2	772,3
7	494,6	607,6	767,2
8	491,1	610,1	770,1
9	485,2	606,8	768,6
10	485,6	604,9	765,7
Среднее значение	491,5	608,0	770,0
$V_H, \%$	0,9	0,3	0,3

Для эталонной меры твердости 491,5 HLD твердость на стороне А ($491,5 \pm 5,4$) HLD, для эталонной меры твердости 608 HLD твердость на стороне А ($608,0 \pm 5,6$) HLD, для эталонной меры твердости 770 HLD твердость на стороне А ($770,0 \pm 7,1$) HLD.

Неопределенность результатов измерения величины твердости состоит из неопределенности метода измерения и неоднородности распределения твердости на эталонной мере твердости, выраженной повторяемостью.

Указанная расширенная неопределенность результатов измерений определяется как стандартная неопределенность измерения, умноженная на коэффициент охвата $k = 2$, который для нормального распределения соответствует доверительной вероятности приблизительно 95%. Стандартная неопределенность измерения была определена в соответствии с ISO 1995.

Результаты калибровки позволяют применять меры 608 и 770 в качестве эталонных мер 1-го разряда

5.2.2 Исследование характеристик экспериментального образца эталонной установки 2-го разряда

Для исследования повторяемости были проведены измерения на комплекте мер твердости 1-го разряда по шкале Либс D с помощью эталонной установки 2-го разряда. На каждой мере проводилось по 10 измерений, результаты указаны в таблице 17.

Таблица 17 – Результаты измерений на мерах твердости 491,5, 608 и 770 HLD

№ изм	Твердость образцовой меры твердости, ед.тв.		
	491,5	608	770
1	493	610	765
2	491	606	768
3	495	606	762
4	490	605	763
5	492	612	773
6	494	609	767
7	490	607	768
8	496	606	769
9	493	603	772
10	489	604	771
Среднее значение	492	607	768
СКО	2,3	2,8	3,7
Коэффициент вариации V_H , %	0,47	0,46	0,48
Требуемое значение V_H , %	0,5	0,5	0,5
Предельная ошибка G_H , %	1,1	0,46	0,6

При поверке по эталонным мерам твердости требования к предельному отклонению твердости по Либу удовлетворены, когда выполняется условие (71):

$$G_H \geq |b_H(H)| + u_{CRM}, \quad (71)$$

где G_H – предельная ошибка твердости по Либу;

u_{CRM} – неопределенность эталонной меры твердости на основе свидетельства о поверке (сертификата о калибровке) при $k = 1$;

b_H – погрешность твердости по Либу, определяемая по формуле (72):

$$b_H = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n H_i - H_{CRM}, \quad (72)$$

где H_{CRM} – значение твердости по Либу эталонной меры твердости на основе свидетельства о поверке (сертификата о калибровке);

H_i – единичное измерение твердости по Либу.

Тогда на примере первого измерения

$$b_H = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} 493 - 489 = 0,8.$$

Неопределенность u_{CRM} эталонных мер твердости 491,5, 608, 770 взята из документации и составляет 4,6, 1,6 и 2,4 единиц твердости соответственно.

Расчет предельной ошибки G_H :

$$G_H = \frac{(|0,8| + 4,6) \cdot 100\%}{491,5} = 1,1\%,$$

$G_H = 1,1\% < 2\%$ - что соответствует требованиям стандарта к эталонным установкам 2-го разряда.

5.3 Исследование метрологических характеристик экспериментального образца эталонной установки при передаче единицы твердости эталонным мерам 2-го разряда

5.3.1 Технология изготовления мер твердости 2-го разряда

Материалом для изготовления эталонных мер твердости были выбраны стали марок ХВГ (для более твердых мер) и ШХ15 (для мягкой меры) в виде листового проката требуемой толщины.

Для изготовления мер на фрезерном станке из листа вырезались цилиндрические заготовки необходимого диаметра. Далее посредством токарной обработки и предварительной шлифовки с заготовок снимался верхний слой наклепанного материала и внешний диаметр протачивался до значения, указанного на рисунке 30.

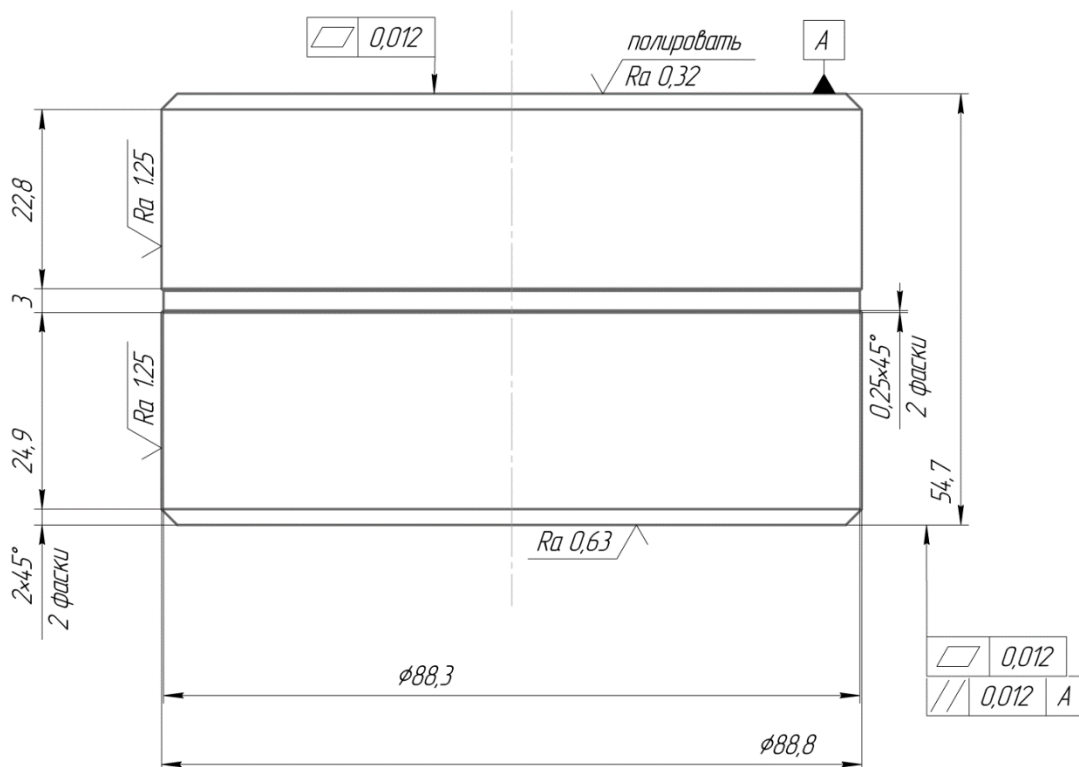


Рисунок 30 – Эскиз меры твердости 2-го разряда

Проточенные заготовки нормализовались для приведения структуры стали «к общему знаменателю» и подготовки к последующей термической обработке – закалке (заготовки из стали ШХ15 после нормализации отправлялись сразу на чистовую шлифовку). Нормализация осуществлялась в виде нагрева до температур выше температуры фазовых превращений и охлаждения на спокойном воздухе. При закалке детали нагревались до температуры (820-850) °С (ХВГ) и охлаждаются в расплаве солей с водой. Скорость охлаждения стали, нагретой до температуры закалки, оказывает решающее влияние на результат термической обработки.

Завершающей операцией термической обработки является отпуск при температуре (100-600) °С (ХВГ), который проводится с целью уменьшения

внутренних напряжений и получения более равномерной структуры. В зависимости от выбранных температур закалки и отпуска, времени выдержки, а также способа охлаждения деталей можно добиться различных значений твердости.

После термообработки обезуглероженный поверхностный слой детали необходимо сошлифовать. Снятие поверхностного слоя выполняют многоступенчатой шлифовкой алмазным кругом с минимальной подачей без применения СОЖ. В процессе шлифования припуски на предварительную и на окончательную доводку оставляют в пределах 0,007–0,01 мм и 0,002–0,003 мм соответственно.

С целью устранения возможных внутренних напряжений, возникающих в процессе шлифования, меры подвергают процессу искусственного старения, после чего производится предварительная и окончательная доводка. Процесс доводки предназначен для обеспечения точности размеров, параллельности и притираемости поверхностей.

Доводку производят в светлом, сухом вентилируемом помещении без пыли и сквозняков при температуре окружающей среды в 20 °С и влажности 50–60 %.

В процессе доводки меру, предварительно промытую в бензине, перемещают по поверхности доводочной плиты возвратно-поступательными движениями со смещением таким образом, чтобы каждое движение осуществлялось в новой области поверхности плиты. В процессе доводки нагрузка на меру должна быть равномерной и легкой. Каждый цикл состоит из двух-трех движений, после завершения цикла меру поворачивают на 180° и приподнимают над доводочной плитой. Если мера имеет две рабочие поверхности, припуск на доводку снимают равномерно с обеих поверхностей.

Обеспечение плоскопараллельности поверхностей обеспечивается контролем усилия в процессе доводки. В местах выступов на поверхности при доводке следует прикладывать дополнительное усилие, после чего распределять усилие по всей поверхности [98].

5.3.2 Определение метрологических характеристик рабочих мер твердости 2-го разряда при их калибровке на экспериментальном образце эталонной установки 2-го разряда

Во-первых, измерения проводились при помощи экспериментального образца эталонной установки 2-го разряда. Результаты указаны в таблице 18.

Таблица 18 – Результаты измерений на мерах твердости 495, 588 и 806 HLD

№ изм	Твердость образцовой меры твердости, ед.тв.		
	495	588	806
1	491	593	812
2	515	581	811
3	491	598	801
4	493	582	798
5	509	584	796
6	490	593	815
7	486	595	807
8	498	589	810
9	493	583	806
10	498	581	802
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

Далее измерения проводились при помощи рабочего средства измерений (твердомера Либа по шкале D). Результаты указаны в таблице 19.

Таблица 19 – Результаты измерений на мерах твердости 495, 588 и 806 HLD при помощи твердомера.

№ изм	Твердость образцовой меры твердости, ед.тв.		
	495	588	806
1	514	574	819
2	489	598	810
3	498	577	792
4	500	596	793
5	481	599	811
6	490	598	809
7	513	589	817
8	488	580	801
9	491	582	792
10	483	575	819
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

Коэффициент вариации для эталонных установок рассчитывается по формуле (73):

$$V_H = \frac{s_H}{\bar{H}} \cdot 100 \%, \quad (73)$$

где s_H – стандартное отклонение, определяемое по формуле (74):

$$s_H = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (H_i - \bar{H})^2}{n-1}}; \quad (74)$$

$$s_H = \sqrt{\frac{\sum_1^{10} (491-496)^2}{10-1}} = 9,1,$$

где \bar{H} – среднее арифметическое значение твердости, рассчитываемое по формуле:

$$\bar{H} = \frac{491+515+\dots+498}{10} = 496.$$

Тогда

$$V_H = \frac{9,1}{496} * 100 \% = 1,83\%.$$

При поверке по эталонным мерам твердости требования к предельному отклонению твердости по Либу удовлетворены, когда выполняется условие (75):

$$G_H \geq |b_H(H)| + u_{CRM}, \quad (75)$$

где G_H – предельная ошибка твердости по Либу;

u_{CRM} – неопределенность эталонной меры твердости на основе свидетельства о поверке (сертификата о калибровке) при $k = 1$;

b_H – погрешность твердости по Либу, определяемое по формуле (76):

$$b_H = \frac{1}{n} \sum_1^n H_i - H_{CRM}, \quad (76)$$

где H_{CRM} – значение твердости по Либу эталонной меры твердости на основе свидетельства о поверке (сертификата о калибровке);

H_i – единичное измерение твердости по Либу.

Тогда на примере первого измерения

$$b_H = \frac{1}{10} \sum_1^{10} 491 - 498 = 1,4.$$

Неопределенность u_{CRM} эталонных мер твердости 495, 588, 806 взята из документации и составляет 4,6, 1,6 и 2,4 единиц твердости соответственно.

Расчет предельной ошибки G_H :

$$G_H = \frac{(|1,4|+4,6) \cdot 100\%}{495} = 1,2\%,$$

$$G_H = 1,2\% < 2\% - \text{условие выполняется.}$$

Предельно допустимая ошибка твердомера рассчитывается по формуле:

$$E_{rel} = \frac{\bar{H} - H_{CRM}}{H_{CRM}} * 100 \%,$$

где \bar{H} – среднее значение для каждой из мер;

H_{CRM} – значение твердости каждой из мер, ед. тв.

Пример расчета для таблицы 19:

$$E_{rel495} = \frac{494,7-495}{495} * 100 \% = 0,06\%.$$

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. Номинальные значения мер соответствуют требуемым диапазонам значений твердости. Значения коэффициентов вариации V_H , минимальной повторяемости W_H , предельной ошибки G_H и предельной допустимой ошибки твердомера E_{rel} не выходят за установленные предельно допустимые отклонения. Таким образом, разработанные меры допустимы к применению в качестве эталонных мер 2-го разряда в соответствии с разработанным проектом поверочной схемы. С помощью разработанного комплекта мер были проведены исследования метрологических характеристик рабочих средств измерений (твердомеров) по шкале Либа D, которые подтвердили их соответствие установленным требованиям.

5.4 Выводы по главе 5

1. Проведены исследования метрологических характеристик изготовленного экспериментального образца эталонной установки 2-го разряда, эталонных мер твердости и средств измерений твердости по шкале Либа D;
2. 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 средствам 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 поверке 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 повысит достоверность и информативность данного вида измерений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Артемьев, Ю.Г. Контактный динамический метод и прибор контроля твердости металлов и сплавов/ Ю.Г. Артемьев // Ж. Заводская лаборатория. 1989г. Т55, №12, с.79-83.
2. Асланян, А.Э. Государственный первичный эталон твердости металлов по шкале Шора D и шкалам Либа ГЭТ 161-2019 / А.Э. Асланян, Э.Г. Асланян, С.М. Гаврилкин, А.С. Дойников, А.Н. Щипунов // Измерительная техника, 2020 г., №2, С. 6-10.
3. Аширова, А.Д. Возможности применения портативных твердомеров для неразрушающего контроля механических свойств покрытий / А.Д. Аширова, К.В. Гоголинский, **А.А. Никазов** // Сборник трудов XXII всероссийской конференции по неразрушающему контролю и технической диагностике – 2020 - С. 181-184.
4. Батуев, Г. С. Инженерные методы исследования ударных процессов / Г. С. Батуев [и др.] // Изд. 2-е перераб. М.: Машиностроение, 1977 238, [2] с.: ил.
5. Биргер, И.А. Сопротивление материалов / И.А. Биргер, Р.Р. Мавлютов // Изд. 2. – М. «Ленанд». 2015. с. 76.
6. Гогоберидзе, Д.Б. Твердость и методика ее измерения / Д.Б. Гогоберидзе // — М.: Машгиз, 1952. — 282 с.
7. Гоголинский, К.В. Контроль механических свойств твердомерами: преимущества, ограничения, перспективы / К.В. Гоголинский, В.А. Сясько, **А.А. Никазов**, А.С. Уманский, Т.И. Бобкова // Измерительная техника и технологии контроля параметров природных и техногенных объектов минерально-сырьевого комплекса: Сборник научных трудов - 2019 - С. 58-60
8. Гоголинский, К.В. Методы и средства контроля механических свойств микро- и нанометровых покрытий и модифицированных приповерхностных слоев / К.В. Гоголинский, В.А. Сясько // В мире НК, №3(61), 2013, С. 136-149.
9. Головин, Ю.И. Наноиндентирование и механические свойства твердых тел в субмикрообъемах, тонких приповерхностных слоях и пленках / Ю.И. Головин // Физика твердого тела, №12(50) 2008, С. 2113-2141.

10. ГОСТ 18661-73 Сталь. Измерение твердости методом ударного отпечатка
11. ГОСТ 22761-77 Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Бринеллю переносными твердомерами статического действия.
12. ГОСТ 22762-77 Металлы и сплавы. Метод измерения твердости на пределе текучести вдавливанием шара.
13. ГОСТ 22975-78 Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Роквеллу при малых нагрузках (по Супер-Роквеллу).
14. ГОСТ 2999-75 Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Виккерсу.
15. ГОСТ 23273-78 Металлы и сплавы. Измерение твердости методом упругого отскока бойка (по Шору).
16. ГОСТ 8.061-80 Государственная система обеспечения единства измерений, Поверочные схемы, содержание и построение.
17. ГОСТ 8.063-2007 Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Государственная поверочная схема для средств измерений твердости металлов и сплавов по шкалам Виккерса.
18. ГОСТ 9012-59 Металлы. Метод измерения твердости по Бринеллю.
19. ГОСТ 9013-59 Металлы. Метод измерения твердости по Роквеллу.
20. ГОСТ 9450-76 (СТ СЭВ 1195-78) Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников.
21. ГОСТ Р 8.695-2009 ГСИ. Металлы и сплавы. Измерения твердости по Виккерсу. Часть 2. Поверка и калибровка твердомеров.
22. ГОСТ Р 8.747-2011 (ИСО 6507-3:2005) Государственная система обеспечения единства измерений. Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Виккерсу. Часть 3. Калибровка эталонных мер твердости.
23. ГОСТ Р 8.748-2011 (ИСО 14577-1:2002) ГСИ. Металлы и сплавы. Измерение твердости и других характеристик материалов при инструментальном индентировании. Часть 1. Метод испытаний.

24. ГОСТ Р 8.904-2015 Государственная система обеспечения единства измерений. Измерение твердости и других характеристик материалов при инструментальном индентировании. Часть 2. Поверка и калибровка твердомеров.

25. ГОСТ Р 8.907-2015 Государственная система обеспечения единства измерений. Государственная поверочная схема для средств измерений твердости по шкалам Мартенса и шкалам индентирования.

26. ГОСТ Р 8.969-2019 (ИСО 16859-1:2015) Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Металлы и сплавы. Определение твердости по шкалам Либа. Часть 1. Метод измерений.

27. ГОСТ Р ИСО 6507-1-2007 Металлы и сплавы. Измерение твердости по Виккерсу. Часть 1. Метод измерения.

28. Григорович, В.К. Твердость и микротвердость металлов / В.К. Григорович // Изд-во «Наука», 1976.

29. Давиденков, Н.Н. Динамическая прочность и хрупкость металлов / Н.Н. Давиденков // Избранные труды : В 2-х т. - Киев : Наукова думка, 1981. - Т. 1. 704 с., стр. 424-446.

30. Давиденков, Н.Н. Некоторые проблемы механики материалов / Н.Н. Давиденков // [Л.] : Ленингр. газетно-журн. и кн. изд-во, 1943. – 152 с.

31. Джонсон, К. Механика контактного взаимодействия / К. Джонсон // М: Мир, 1989. – 510 с., стр. 408-414.

32. Дрозд, М.С., Определение механических свойств металла без разрушения / М.С. Дрозд // М. «Металлургия», 1965, 171 с.

33. Думанский, И.О. Измерение твердости металлов и сплавов / И.О. Думанский, В.М. Александров, В.Л. Сытин // Архангельск: САФУ, 2013. – 18 с.

34. Егоров, Р.А. Аппаратно-алгоритмическое обеспечение процесса динамического индентирования / Р.А. Егоров, А.В. Ильинский, М.В. Кузьмичев, А.В. Федоров // Дефектоскопия. - 2020. - № 6. - С. 61-69.

35. И 1.2.1.02.019.1121-2016 Определение механических свойств металла оборудования атомных станций безобразцовыми методами по характеристикам твердости. Инструкция. 2016.

36. Ильинский, А.В. Исследование динамической твердости конструкционных металлических материалов / А.В. Ильинский, А.В. Федоров, К.А. Степанова, И.Ю. Кинжагулов, И.О. Краснов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2020. – Т. 86. - № 1. – С. 57-61.

37. Кашапова, И.А. Обоснование применимости метода динамического индентирования для контроля твердости материалов покрытий элементов жидкостных ракетных двигателей / И.А. Кашапова, А.В. Федоров, Р.А. Егоров // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. - 2020. - № 5(343). - С. 144-152.

38. Кашапова, И.А. Разработка метода оценки твердости покрытий при динамическом индентировании / И.А. Кашапова, А.В. Федоров, Р.А. Егоров, А.В. Ильинский // Контроль. Диагностика. - 2020. - Т. 23. - № 10. - С. 65-71.

39. Константа [Электронный ресурс] // URL: https://constant.ru/catalog/tverdomery/konstanta_kt/ (Дата обращения: 20.10.2018).

40. Крень, А.П. Контроль физико-математических свойств и трещиностойкости неметаллических конструкционных материалов методами индентирования: автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук : специальность 05.11.13 / Крень Александр Петрович; Государственное научное учреждение "Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси".

41. Крень, А. П. Оценка погрешности косвенных измерений физико-механических характеристик материалов методом динамического индентирования / Крень А. П., Мацулевич О. В., Протасеня Т. А., Делендик М. Н. // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. 2020. Т. 65, № 4. С. 487–495.

42. Мильман, Ю.В. Фазовые превращения под давлением при индентировании / Ю.В. Мильман // Физика и техника высоких давлений. – 2011. – 21(1) - С. 7-13.

43. МУ 21У-003-2004 Методические указания по проведению экспертизы промышленной безопасности насосов центробежных типа ЦНС с истекшим сроком службы и определению возможности их дальнейшей эксплуатации. 2004.

44. **Никазов, А.А.** Обеспечение достоверности результатов измерений твердости по методу Либа / **А.А. Никазов** // Сборник статей Международной научно-практической конференции – 2016 - Т. 3 - С. 130-134.

45. НП-046-18 Правила устройства и безопасной эксплуатации паровых и водогрейных котлов для объектов использования атомной энергии.

46. Орешко, Е. И. Методы измерения твёрдости материалов (обзор) / Е. И. Орешко, Д. А. Уткин, В. С. Ерасов, А. А. Ляхов // Труды ВИАМ, № 1 (20), 2020, с. 101–117.

47. 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.

48. ПРИКАЗ от 24 февраля 2021 года N 158 Об утверждении Государственной поверочной семы для средств измерений твердости металлов по шкале Шора D и шкалам Либа.

49. Приказ Ростехнадзора от 15.12.2020 №535 «Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила осуществления эксплуатационного контроля металла и продления срока службы основных элементов котлов и трубопроводов тепловых электростанций»

50. ПРИКАЗ Ростехнадзора от 24 декабря 2018 года N 636 Об утверждении Руководства по безопасности "Обследование технического состояния изотермических резервуаров сжиженных газов".

51. Проект ГОСТ Р Металлы и сплавы. Измерение твердости по Либу. Метод измерения, поверка и калибровка твердомеров и мер твердости // URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200116758#2/> (Дата обращения: 31.07.2018).

52. РД 153-39.4Р-124-02 Положение о порядке проведения технического освидетельствования и продления срока службы технологического оборудования нефтеперекачивающих станций магистральных нефтепроводов.

53. РД 32 ЦВ 050-2005 Методика выполнения измерений надрессорной балки, боковых рам, пружин и рессорного комплекта при проведении плановых видов ремонта тележек 18-100. 2005.

54. РД ЭО 0185-00 Методика оценки технического состояния и остаточного ресурса трубопроводов энергоблоков АЭС.

55. Рудницкий, В.А. Метод динамического индентирования для оценки механических характеристик металлических материалов / В. А. Рудницкий, А.В. Рабцевич // Дефектоскопия. – 1997. – № 4. – С. 79–86.

56. Рудницкий, В. А. Оценка пластичности металлических материалов методом динамического индентирования / В. А. Рудницкий, А. П. Крень, Г. А. Ланцман // Литье и металлообработка. -2017. -№ 2 (87). -С. 81-87.

57. Рудницкий, В.А. Соотношение динамической и статической твердости металлов / В.А. Рудницкий, А.П. Крень, Г.А. Ланцман // Вес. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.- техн. наук. – 2016. № 4. С. 16–22.

58. СО 153-34.17.439-2003 Инструкция по продлению срока службы сосудов, работающих под давлением.

59. СО 153-34.17.440-2003 Инструкция по продлению срока эксплуатации паровых турбин сверх паркового ресурса. 2003.

60. СТО-ГК "Трансстрой"-012-2007 Стальные конструкции мостов. Заводское изготовление

61. 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.

62. 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).

63. Сясько, В.А. Программа для управления измерителем скорости ударника / В.А. Сясько, **А.А. Никазов**, А.Л. Малухин // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ, правообладатель: ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет» (RU) – №2021669537; заявл. 22.11.2021; опубл. 30.11.2021.

64. Сясько, В.А. Разработка эталона твердости по Либу второго разряда / В.А. Сясько, К.В. Гоголинский, **А.А. Никазов** // В мире неразрушающего контроля – 2017 - Т. 20. №1 - С. 16-19.

65. ASTM E140-12B(2019)e1 Standard Hardness Conversion Tables for Metals Relationship Among Brinell Hardness, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Superficial Hardness, Knoop Hardness, Scleroscope Hardness, and Leeb Hardness. 2019.

66. ASTM E 448-82. Standard Practice for Scleroscope Hardness Testing of Metallic Materials, 2008.

67. Cohen, L. Time-Frequency Analysis / L. Cohen // Prentice Hall PTR (1995) 300.

68. Cordill, M. Effects of dynamic indentation on the mechanical response of materials / M. Cordill, N. Moody, W. Gerberich // Journal of Materials Research, 2008, 23(6), 1604-1613.

69. Formisano, A. Leeb hardness experimental tests on carpentry steels: Surface treatment effect and empirical correlation with strength / A. Formisano, G. Chiumiento, G. Di Lorenzo // AIP Conf. Proc. 1978, (2018).

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

71. Gorbashova, M. Application of direct optical heterodyning methods for studying the processes of chondrite targets destruction by laser radiation / M. Gorbashova, I. Burdonskiy, K. Gubskiy, A. Kuznetsov, A. Ramazanov, K. Lukyanov,

A. Leonov, K. Makarov, I. Timofeyev and V. Yufa // J. Phys.: Conf. Ser. 941 (2017) 012002.

72. Herrmann, K. Guidelines for the Evaluation of the Uncertainty of Hardness Measurements / K. Herrmann // MAPAN - Journal of Metrology Society of India, Vol. 20, №1, 2005, pp. 5-13.

73. Herrmann, K. Reference measuring instrument for calibration of Leeb-hardness / K. Herrmann // Physikalisch-Technische Bundesanstalt. Scientific news from division 5, review of the Annual Report, 2007. http://www.ptb.de/en/org/5/nachrichten5/archiv/2007/nachrichten5_2007.htm. (Дата обращения: 08.12.2016).

74. ISO 18265:2013 Metallic materials. Conversion of hardness values. 2013.

75. ISO/DIS 16859-1. Metallic materials - Leeb hardness test - Part 1: Test method, 2015.

76. ISO/DIS 16859-2. Metallic materials - Leeb hardness test - Part 2: Verification and calibration of the testing devices, 2015.

77. ISO/DIS 16859-3. Metallic materials - Leeb hardness test - Part 3: Calibration of reference test blocks, 2015.

78. Koeppel, B.J. Dynamic Indentation Hardness of Metals / B.J. Koeppel, G. Subhash // IUTAM Symposium on Micro- and Macrostructural Aspects of Thermoplasticity. Solid Mechanics and its Applications, vol 62. Springer, Dordrecht (1999).

79. Kompatscher, M. Dynamic Hardness Measurements / M. Kompatscher // MAPAN - Journal of Metrology Society of India, Vol. 20, №1, 2005, pp. 25-36.

80. Kompatscher, M. Equotip rebound hardness testing after D. Leeb / M. Kompatscher // HARDMEKO 2004, Hardness Measurements Theory and Application in Laboratories and Industries 11–12 November, 2004, Washington, D.C., USA.

81. Kren, A.P. Complex of Devices for Determining the Physical and Mechanical Properties of the Carbon Materials Used in the Rocket and Space Technology by the Impact Indentation Method / A.P. Kren, T.A. Protasenia, A.K. Arnautov et al. // Mech Compos Mater 51, 225–230 (2015).

82. Kren, A.P. Determination of the Strain-Hardening Exponent of a Metallic Material by Low-Speed Impact Indentation / A.P. Kren, V.A. Rudnitskii // Russ. Metall. 2019, 478–483 (2019).
83. Kren, A.P. Influence of the Dynamic Indentation Parameters on the Behavior of Metals during the Penetration of an Indenter with a Spherical Tip / A.P. Kren, V.A. Rudnitskii, G.A. Lantsman et al. // Russ. Metall. 2021, 563–569 (2021).
84. Leeb, D.H. Dynamische Hartepriifung, / D.H. Leeb, W.W. Weiler, K. Muller, D.M. Rupp // Héirteprüfung an Metallen und Kunststoffen, 2nd ed., Expert-Verlag, Ehningen bei Boblingen, 1990.
85. Leeb, D.H. New dynamic method for Hardness testing of metallic materials / D.H. Leeb // VDI-Report No. 308 (1978) 123-128.
86. Liu, D. Nondestructive Post-fire Damage Assessment of Structural Steel Members Using Leeb Harness Method / D. Liu, X. Liu, F. Fu, W. Wang // Fire Technol. 56, 1777–1799 (2020).
87. Low, S. State of the Art of the Conventional Hardness Measuring Methods: Rockwell, Brinell and Vickers / S. Low // MAPAN - Journal of Metrology Society of India, Vol. 20, №1, 2005, pp. 15-24.
88. Martel, R. Commission des Méthodes d'Essai des Matériaux de Construction / R. Martel // Vol. 3, 1895, p. 261.
89. Marusin, M.P. Determination of the Crack Resistance Characteristics of Graphitized Carbon Materials by the Dynamic Indentation Method / M.P. Marusin, A.V. Fedorov, A.P. Kren' et al. // Meas Tech 57, 1411–1415 (2015).
90. Proceq [Электронный ресурс] // URL: https://www.proceq.com/uploads/tx_proceqproductcms/import_data/files/Equotip%20Family%20Cue%20Cards.pdf (Дата обращения: 10.10.2018).
91. PTB [Электронный ресурс] // URL: http://www.ptb.de/de/org/5/nachrichten5/archiv/2007/wirtschaft/abteilung5_w02.htm (дата обращения: 17.07.2017).
92. SAE J417_201801 Hardness Tests and Hardness Number Conversions. 2018. 62

93. Schwenk, D. Calibration of the impact velocity at portable hardness testing devices in accordance with Leeb / D. Schwenk, M. Bandel // IMEKO 22nd TC3, 12th TC5 and 3rd TC22 International Conferences, 3 to 5 February, 2014, Cape Town, Republic of South Africa.
94. Schwenk, D. Leeb hardness-calibration-machine / D. Schwenk // IMEKO 2010 TC3, TC5 and TC22 Conferences Metrology in Modern Context, Pattaya, Thailand, 2010, p. 369-372.
95. Subhash, G. Dynamic Indentation Testing / G. Subhash, H. Kuhn, D. Medlin // Mechanical Testing and Evaluation, ASM Handbook Vol. 8, Materials Park, Ohio, 2000.
96. 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>.
97. Tabor, D. "The Hardness of Metals / D. Tabor // Oxford University Press, London, 1951.
98. Titus, S.S.K. Hardness and Microstructure Studies of Standard Hardness Blocks / S.S.K. Titus, S.K. Jain, Anil Kumar and K.K. Jain // MAPAN - Journal of Metrology Society of India, Vol. 20, №1, 2005, pp. 37-41.
99. Wei, S. Leeb Hardness Standard with Laser Measuring / Shi Wei, Zeng Wu, Li Qingzhong // XX IMEKO World Congress «Metrology for Green Growth», Busan, Republic of Korea, September 9–14, 2012.
100. Yamamoto, M. Proof examination on small rebound hardness carried out with HLD/HLE standard blocks / M. Yamamoto, T. Yamamoto, K. Miyahara, S. Maki, M. Nakamura // XX IMEKO World Congress Metrology for Green Growth September 9–14, 2012, Busan, Republic of Korea.
101. Yang, J. Dynamic Indentation of an Elastic-Plastic Multi-Layered Medium by a Rigid Cylinder / J. Yang, K. Komvopoulos // *ASME. J. Tribol.* January 2004; 126(1): 18–27.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Калибровочные сертификаты эталонных мер твердости 1-го разряда по шкале Либа D (PTB)



Kalibrierschein Calibration Certificate

Gegenstand: <i>Object:</i>	Härtevergleichsplatte <i>Hardness test block</i>
Hersteller: <i>Manufacturer:</i>	Nantong Ketech Instrument Co., Ltd
Typ: <i>Type:</i>	Leeb-Härte Skala HLD <i>Leeb hardness scale HLD</i>
Kennnummer: <i>Serial number:</i>	488 HLD 49010
Auftraggeber: <i>Applicant:</i>	NDT1 KRAFT Ltd. Krymska 238/18 101 00 Prague
Anzahl der Seiten: <i>Number of pages:</i>	3
Geschäftszeichen: <i>Reference No.:</i>	PTB-5.11-4073046
Kalibrierzeichen: <i>Calibration mark:</i>	50101 PTB 15
Datum der Kalibrierung: <i>Date of calibration:</i>	2015-01-07
Im Auftrag <i>On behalf of PTB</i>	Braunschweig, 2015-01-08

391 00A n

F. Menelao

Siegel
SealIm Auftrag
On behalf of PTB

M. Herdin

Kalibrierscheine ohne Unterschrift und Siegel haben keine Gültigkeit. Dieser Kalibrierschein darf nur unverändert weiterverbreitet werden. Auszüge bedürfen der Genehmigung der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt.
Calibration certificates without signature and seal are not valid. This calibration certificate may not be reproduced other than in full. Extracts may be taken only with permission of the Physikalisch-Technische Bundesanstalt.

Messparameter
Measuring parameters

 Messung der Härte nach DIN 50156-3 mit der Härte-Normalmeseinrichtung HN-01-D
Hardness measurement according to DIN 50156-3 with the hardness standard machine HN-01-D

 Härteskala: HLD
Hardness scale:

 Eindringkörper-Nr.: HLD-1
Indenter-No.:

 Temperatur: $(20 \pm 1) \text{ }^\circ\text{C}$
Temperature:
Messergebnisse
Measuring results

 Dicke der Härtevergleichsplatte: 54,60 mm
Thickness of reference block:

 Leeb-Härte der an 10 Stellen jeweils auf der Oberseite (Seite A) der Härtevergleichsplatte
 erzeugten Prüfeindrücke, in HLD
Leeb hardness of the indentations produced on the upper side (side A) of the hardness reference block, in HLD
 $V_H = \text{Variationskoeffizient}$
 $V_H = \text{coefficient of variation}$

Seite: <i>Side</i>	1	2	3	4	5	Mittelwert <i>Mean value</i>	$V_H, \%$
	6	7	8	9	10		
A	497,8	489,2	487,6	492,9	497,6	491,5	0,9
	493,7	494,6	491,1	485,2	485,6		

 Die Härte beträgt auf der Seite A $(491,5 \pm 5,4)$ HLD
The hardness is on side A $(491,5 \pm 5,4)$ HLD

Die Messunsicherheit des Härtewerts setzt sich aus der Unsicherheit des Messverfahrens (0,9 %) und der Inhomogenität der Härteverteilung auf der Härtevergleichsplatte, ausgedrückt durch die Spannweite, zusammen.

The uncertainty of measurement of the hardness value consists of the uncertainty of the method of measurement and the inhomogeneity of the hardness distribution on the reference block expressed by the repeatability.

 Angegeben ist die erweiterte Messunsicherheit, die sich aus der Standardmessunsicherheit durch Multiplikation mit dem Erweiterungsfaktor $k = 2$ ergibt. Sie wurde gemäß dem „Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement“ (ISO, 1995) ermittelt. Der Wert der Messgröße liegt im Regelfall mit einer Wahrscheinlichkeit von annähernd 95 % im zugeordneten Werteintervall.

The reported expanded uncertainty of measurement is stated as the standard uncertainty of measurement multiplied by the coverage factor $k = 2$, which for a normal distribution corresponds to a coverage probability of approximately 95 %. The standard uncertainty of measurement has been determined in accordance with „Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement“ (ISO, 1995).

Dieser Kalibrierschein wird in deutscher Sprache geschrieben. Bei Widersprüchen zwischen der deutschsprachigen Version und der englischen Übersetzung ist die deutsche Version maßgebend.

This Calibration Certificate is written in German. In case of any conflict between the German language version and the English translation of it, the German version shall prevail.



Kalibrierschein

Calibration Certificate

Gegenstand: <i>Object:</i>	Härtevergleichsplatte <i>Hardness test block</i>	
Hersteller: <i>Manufacturer:</i>	Nantong Kotech Instrument Co., Ltd	
Typ: <i>Type:</i>	Leeb-Härte Skala HLD <i>Leeb hardness scale HLD</i>	
Kennnummer: <i>Serial number:</i>	609 HLD 49007	
Auftraggeber: <i>Applicant:</i>	NDT1 KRAFT Ltd. Krymska 238/18 101 00 Prague	
Anzahl der Seiten: <i>Number of pages:</i>	3	
Geschäftszeichen: <i>Reference No.:</i>	PTB-5.11-4073046	
Kalibrierzeichen: <i>Calibration mark:</i>	50102 PTB 15	
Datum der Kalibrierung: <i>Date of calibration:</i>	2015-01-07	
Im Auftrag <i>On behalf of PTB</i>	Braunschweig, 2015-01-08	Im Auftrag <i>On behalf of PTB</i>
 F. Menelao	Siegel <i>Seal</i> 	 M. Herdin

391 00A n

Messparameter
Measuring parameters

 Messung der Härte nach DIN 50156-3 mit der Härte-Normalmesseinrichtung HN-01-D
 Hardness measurement according to DIN 50156-3 with the hardness standard machine HN-01-D

 Härteskala: HLD
 Hardness scale:

 Eindringkörper-Nr.: HLD-1
 Indenter-No.:

 Temperatur: $(20 \pm 1) ^\circ\text{C}$
 Temperature:

Messergebnisse
Measuring results

 Dicke der Härtevergleichsplatte: 54,60 mm
 Thickness of reference block:

 Leeb-Härte der an 10 Stellen jeweils auf der Oberseite (Seite A) der Härtevergleichsplatte erzeugten Prüfeindrücke, in HLD
 Leeb hardness of the indentations produced on the upper side (side A) of the hardness reference block, in HLD

 V_H = Variationskoeffizient
 V_H = coefficient of variation

Seite: Side	1	2	3	4	5	Mittelwert Mean value	V_H , %
	6	7	8	9	10		
A	608,2	607,1	608,7	607,2	610,0	608,0	0,3
	609,2	607,6	610,1	606,8	604,9		

 Die Härte beträgt auf der Seite A $(608,0 \pm 5,6)$ HLD
 The hardness is on side A $(608,0 \pm 5,6)$ HLD

 Die Messunsicherheit des Härtewerts setzt sich aus der Unsicherheit des Messverfahrens (0,9 %) und der Inhomogenität der Härteverteilung auf der Härtevergleichsplatte, ausgedrückt durch die Spannweite, zusammen.
 The uncertainty of measurement of the hardness value consists of the uncertainty of the method of measurement and the inhomogeneity of the hardness distribution on the reference block expressed by the repeatability.

 Angegeben ist die erweiterte Messunsicherheit, die sich aus der Standardmessunsicherheit durch Multiplikation mit dem Erweiterungsfaktor $k = 2$ ergibt. Sie wurde gemäß dem „Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement“ (ISO, 1995) ermittelt. Der Wert der Messgröße liegt im Regelfall mit einer Wahrscheinlichkeit von annähernd 95 % im zugeordneten Werteintervall.
 The reported expanded uncertainty of measurement is stated as the standard uncertainty of measurement multiplied by the coverage factor $k = 2$, which for a normal distribution corresponds to a coverage probability of approximately 95 %. The standard uncertainty of measurement has been determined in accordance with „Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement“ (ISO, 1995).


Dieser Kalibrierschein wird in deutscher Sprache geschrieben. Bei Widersprüchen zwischen der deutschsprachigen Version und der englischen Übersetzung ist die deutsche Version maßgebend.

This Calibration Certificate is written in German. In case of any conflict between the German language version and the English translation of it, the German version shall prevail.



Kalibrierschein

Calibration Certificate

Gegenstand: <i>Object:</i>	Härtevergleichsplatte <i>Hardness test block</i>	
Hersteller: <i>Manufacturer:</i>	Nantong Ketech Instrument Co., Ltd	
Typ: <i>Type:</i>	Leeb-Härte Skala HLD <i>Leeb hardness scale HLD</i>	
Kennnummer: <i>Serial number:</i>	768 HLD 49001	
Auftraggeber: <i>Applicant:</i>	NDT1 KRAFT Ltd. Krymska 238/18 101 00 Prague	
Anzahl der Seiten: <i>Number of pages:</i>	3	
Geschäftszeichen: <i>Reference No.:</i>	PTB-5.11-4073046	
Kalibrierzeichen: <i>Calibration mark:</i>	50103 PTB 15	
Datum der Kalibrierung: <i>Date of calibration:</i>	2015-01-07	
Im Auftrag <i>On behalf of PTB</i>	Braunschweig, 2015-01-08	Im Auftrag <i>On behalf of PTB</i>
 F. Menelao	Siegel <i>Seal</i> 	 M. Herdin

391 00A n

Messparameter
Measuring parameters

 Messung der Härte nach DIN 50156-3 mit der Härte-Normalmesseinrichtung HN-01-D
Hardness measurement according to DIN 50156-3 with the hardness standard machine HN-01-D

 Härteskala: HLD
Hardness scale:

 Eindringkörper-Nr.: HLD-1
Indenter-No.:

 Temperatur: $(20 \pm 1) \text{ }^\circ\text{C}$
Temperature:
Messergebnisse
Measuring results

 Dicke der Härtevergleichsplatte: 55,16 mm
Thickness of reference block:

 Leeb-Härte der an 10 Stellen jeweils auf der Oberseite (Seite A) der Härtevergleichsplatte erzeugten Prüfeindrücke, in HLD
Leeb hardness of the indentations produced on the upper side (side A) of the hardness reference block, in HLD
 V_H = Variationskoeffizient
 V_H = coefficient of variation

Seite: <i>Side</i>	1	2	3	4	5	Mittelwert <i>Mean value</i>	V_H , %
	6	7	8	9	10		
A	772,2	769,7	773,3	771,6	769,6	770,0	0,3
	772,3	767,2	770,1	768,6	765,7		

 Die Härte beträgt auf der Seite A $(770,0 \pm 7,1)$ HLD
The hardness is on side A $(770,0 \pm 7,1)$ HLD

Die Messunsicherheit des Härtewerts setzt sich aus der Unsicherheit des Messverfahrens (0,9 %) und der Inhomogenität der Härteverteilung auf der Härtevergleichsplatte, ausgedrückt durch die Spannweite, zusammen.

The uncertainty of measurement of the hardness value consists of the uncertainty of the method of measurement and the inhomogeneity of the hardness distribution on the reference block expressed by the repeatability.

 Angegeben ist die erweiterte Messunsicherheit, die sich aus der Standardmessunsicherheit durch Multiplikation mit dem Erweiterungsfaktor $k = 2$ ergibt. Sie wurde gemäß dem „Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement“ (ISO, 1995) ermittelt. Der Wert der Messgröße liegt im Regelfall mit einer Wahrscheinlichkeit von annähernd 95 % im zugeordneten Werteintervall.

The reported expanded uncertainty of measurement is stated as the standard uncertainty of measurement multiplied by the coverage factor $k = 2$, which for a normal distribution corresponds to a coverage probability of approximately 95 %. The standard uncertainty of measurement has been determined in accordance with „Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement“ (ISO, 1995).

Dieser Kalibrierschein wird in deutscher Sprache geschrieben. Bei Widersprüchen zwischen der deutschsprachigen Version und der englischen Übersetzung ist die deutsche Version maßgebend.

This Calibration Certificate is written in German. In case of any conflict between the German language version and the English translation of it, the German version shall prevail.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Акт внедрения ООО «КОНСТАНТА»

ООО КОНСТАНТА

Почтовый адрес: Россия, 198095,
 г. Санкт-Петербург, а/я 42
ИНН 7805666639, **КПП** 780501001
р/с 40702810500000027063
к/с 30101810000000008852, **БИК** 044030852
 в АО Банк "ПСКБ" г. Санкт-Петербург
ОКПО 27449627
Юр. адрес: Российская Федерация, 198097, г.
 Санкт-Петербург, ул. Маршала Говорова, д. 29,
 литер О
E-mail: office@constanta.ru
Web: www.constanta.ru
 тел./ф.: (812) 372-29-03, (-04)



Утверждаю
 Главный инженер
 ООО «КОНСТАНТА»
 Булатов А.С.

От 05.10.2020 г.

№ 0510-20

Заключение

о внедрении результатов диссертационного исследования
 Никазова Артёма Александровича

Результаты диссертационного исследования А.А. Никазова на
 тему: «Разработка средств метрологического обеспечения измерений
 твердости по методу Либа», представленного на соискание ученой
 степени кандидата технических наук, использованы в практике
 деятельности ООО «КОНСТАНТА» при разработке комплекта рабочей
 конструкторской документации и изготовления прототипа эталона
 твердости по методу Либа второго разряда для калибровки мер
 твердости второго разряда, используемых для производства и
 технического контроля характеристик портативных твердомеров КТ-С,
 реализуемых в странах Евросоюза и КНР, в соответствии с
 разработанным проектом 4-х уровневой схемы прослеживаемости,
 воспроизводящей единицу твердости по методу Либу и
 обеспечивающей передачу значений твердости по шкалам Либа мерам
 твердости и рабочим средствам измерений (твердомерам) и
 выполнение требований стандарта ISO 16859 1-3 «Metallic materials –
 Leeb Hardness test».

Заместитель директора по производству

 Малков О.Л.



ПРИЛОЖЕНИЕ В


Акт внедрения Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет»

ПЕРВОЕ ВЫСШЕЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ УЧЕБНОЕ ЗАВЕДЕНИЕ РОССИИ
 21-я линия, д.2
 Санкт-Петербург, 199106,
 Россия



21stLine, 2
 199106, Saint-Petersburg,
 Russia

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
 Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Утверждаю
 Заведующий кафедрой метрологии,
 приборостроения и управления качеством
 Санкт-Петербургского Горного университета
 д.т.н. Кремчев Э.А.

Справка
 о внедрении результатов диссертационного исследования
 Никазова Артёма Александровича

Результаты диссертационного исследования А.А. Никазова на тему:
 «Разработка средств метрологического обеспечения измерений твердости по методу Либа», представленного на соискание ученой степени кандидата технических наук, использованы при разработке следующих учебных курсов по программам академического бакалавриата и магистратуры на Кафедре метрологии, приборостроения и управления качеством Санкт-Петербургского Горного университета:

Направление подготовки: Приборостроение.

Специальность: Приборы и методы контроля качества и диагностики.

Учебные курсы: Первичные преобразователи измерительных приборов, Точность измерительных приборов, Технологический контроль в процессе производства изделий.

Направление подготовки: Стандартизация и метрология.

Специальность: Метрология и метрологическое обеспечение.

Учебные курсы: Физические основы измерений и эталоны, Информационно-измерительные системы.

Заместитель заведующего кафедрой МПиУК



к.т.н. Сытько И.И.

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2021669537

Программа для управления измерителем скорости
ударника

Правообладатель: *федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский горный университет» (RU)*

Авторы: *Сясько Владимир Александрович (RU), Никазов
Артём Александрович (RU), Малухин Алексей Львович
(RU)*



Заявка № 2021668613

Дата поступления 22 ноября 2021 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 30 ноября 2021 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев