

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский университет ИТМО»

На правах рукописи

Ильинский Александр Вячеславович



**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА ДИНАМИЧЕСКОГО
ИНДЕНТИРОВАНИЯ И СРЕДСТВ КОНТРОЛЯ ТВЕРДОСТИ
МАТЕРИАЛОВ ИЗДЕЛИЙ, ВЫПОЛНЕННЫХ
ПО АДДИТИВНЫМ ТЕХНОЛОГИЯМ**

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
Федоров А.В.

Санкт-Петербург – 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1 АНАЛИЗ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ ТВЕРДОСТИ МАТЕРИАЛОВ ИЗДЕЛИЙ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА.....	12
1.1 Особенности процесса изготовления изделий по аддитивным технологиям.....	12
1.2 Анализ существующих методов и средств для контроля твердости металлических материалов.....	19
1.3 Современное состояние развития метода динамического индентирования.....	25
1.4 Выводы по главе 1	38
ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМИЧЕСКОГО И ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ОБРАБОТКИ ИСХОДНОГО СИГНАЛА МАГНИТОИНДУКЦИОННОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ПРИ КОНТАКТНОМ УДАРНОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ	40
2.1 Теоретические основы расчета параметров контактного ударного взаимодействия индентора с упругопластическим полупространством	40
2.2 Алгоритм и программное обеспечение обработки исходного сигнала магнитоиндукционного преобразователя при контактном ударном взаимодействии	46
2.3 Нормирование параметров контактного ударного взаимодействия ...	54
2.4 Экспериментальная апробация алгоритма и программного обеспечения обработки исходного сигнала магнитоиндукционного преобразователя	56
2.5 Выводы по главе 2	73

ГЛАВА 3 РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОЦЕНКИ ОБЪЕМНОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ ТВЕРДОСТИ ПО ПАРАМЕТРАМ КОНТАКТНОГО УДАРНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ	74
3.1 Подходы к оценке объемной динамической твердости.....	74
3.2 Алгоритм оценки объемной динамической твердости	85
3.3 Апробация алгоритма оценки объемной динамической твердости	89
3.4 Переход от показателей объемной динамической твердости к статической твердости по Бринеллю	92
3.5 Выводы по главе 3	93
ГЛАВА 4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ АПРОБАЦИЯ РАЗРАБОТАННЫХ АЛГОРИТМОВ И МЕТОДА ПРИ КОНТРОЛЕ ТВЕРДОСТИ МАТЕРИАЛОВ ИЗДЕЛИЙ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЕКАНИЯ.....	95
4.1 Анализ контролируемых параметров и источников неопределенности результатов измерений показателей твердости.....	95
4.2 Экспериментальные исследования перехода от показателей объемной динамической твердости к статической твердости по Бринеллю	101
4.3 Экспериментальные исследования определения динамической твердости материалов изделий, выполненных по аддитивным технологиям.....	104
4.4 Выводы по главе 4	108
Заключение	109
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	111
Приложение А Акт о внедрении результатов диссертационной работы	120

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности

На сегодняшний день изделия, выполненные по технологиям аддитивного производства, находят все более широкое применение в различных отраслях промышленности. Технологии аддитивного производства строятся на изготовлении изделия путем послойного добавления материала, что позволяет выполнять сложнопрофильные изделия, которые невозможно получить традиционной механообработкой. Одной из технологий аддитивного производства является селективное лазерное спекание (Selective Laser Sintering). Суть метода селективного лазерного спекания (далее по тексту – СЛС) заключается в послойном спекании мелкодисперсных (как правило, металлических) частиц порошка (гранул) с использованием лазера. В настоящее время изделия, выполненные по данной технологии, повсеместно внедряются в авиационной, ракетно-космической и других ключевых областях мировой промышленности. Например, при производстве изделий ракетно-космической техники, сложнопрофильные детали традиционно изготавливаются из жаропрочных сплавов на основе никеля и титана, которые при малейших отклонениях режима технологического процесса склонны, как к изменению структуры материала, так и к изменению его механических свойств. Поэтому достоверный контроль механических свойств таких материалов позволяет гарантированно оценивать качество контролируемого изделия, как в процессе изготовления, так и в процессе его эксплуатации [27].

Измерение твердости является одним из основных видов механических испытаний, которое нередко применяется на предприятиях-изготовителях.

Существует ряд стандартизованных методов измерения твердости, которые можно классифицировать [27]:

- по способу приложения нагрузки;
- по типу нагружения;
- по способу измерения значений параметров нагружения [27];

– по максимальным значениям прикладываемой испытательной нагрузки [27].

Особенностью известных традиционных методов твердометрии, таких как метод Бринелля, Роквелла, Виккерса, является необходимость использования стационарного оборудования и изготовления специальных образцов-свидетелей для проведения испытаний. Образец-свидетель изделия, выполненного СЛС – это образец, изготовленный в одном производственном цикле с изделием из того же материала. Однако изготовление таких образцов-свидетелей и контроль с их применением связан с существенными временными и экономическими затратами.

Вместе с тем все более широкое применение находит метод динамического индентирования (ДИ), который заключается в ударном внедрении индентора в форме сферы, пирамиды или конуса с заданной кинетической энергией в испытуемый материал. При этом в каждый момент времени внедрения (индентирования) происходит регистрация изменения скорости движения ударника, куда входят непосредственно индентор, постоянный магнит и связующая их конструкция, с помощью катушки индуктивности. При этом на всем промежутке взаимодействия наводится сигнал электродвижущей силы (ЭДС), что и составляет исходный сигнал, который в дальнейшем обрабатывается с помощью заданных алгоритмов.

Основным преимуществом метода ДИ является возможность его использования при проведении оперативного контроля твердости материалов изделий, не изготавливая при этом образцов-свидетелей, что, в свою очередь, несет экономическую выгоду.

Родоначальником метода ДИ является Институт Прикладной Физики Национальной Академии Наук Беларуси в лице В.А. Рудницкого, А.П. Креня, и др. За годы развития, как самого метода динамического индентирования, так и методов контроля твердости в целом, было опубликовано значительное количество работ широкого круга авторов, таких как, А.П. Крень,

В.А. Рудницкий, М.С. Дрозд, В.И. Мощенок, Ю.В. Мильман, П.М. Огар, Н. Lee, G.M. Pharr, S.H. Kim, W.C.Oliver и др.

Стоит отметить, что неразрушающий контроль изделий аддитивного производства регламентируется ГОСТ Р 58600-2019 [8]. Также с недавнего времени существует стандарт ГОСТ Р 58419-2019 «Аддитивные технологии. Изделия из титановых сплавов, изготовленные методом селективного электронно-лучевого сплавления» [9], который в числе прочего, описывает порядок проведения контроля механических свойств и, в частности, твердости. В [9] отмечено о допустимости, по согласованию с потребителем, проведения контроля твердости изделий из титановых сплавов, полученных методом СЛС по ГОСТ Р 56474-2015 [10], который, в свою очередь, регламентирует метод динамического индентирования.

Несмотря на современный уровень развития метода и средств динамического индентирования, который остается на высоком уровне, проблема гарантированного контроля твердости материалов изделий аддитивного производства не в полной мере решена, а внедрение в практику приборов в России осложнено отсутствием полностью отечественных разработок, а существующее программное обеспечение приборов ДИ имеет закрытую архитектуру и не приспособлено к адаптации, как под конкретные задачи неразрушающего контроля механических свойств материалов, так и под конкретные материалы. Поэтому задача дальнейшего развития метода ДИ и совершенствования алгоритмического и программного обеспечения видится актуальной [27].

Целью диссертационных исследований является развитие метода и совершенствование алгоритмического и программного обеспечения приборов динамического индентирования для обеспечения оперативного контроля твердости металлических материалов изделий, получаемых с использованием технологий селективного лазерного спекания, без использования образцов-свидетелей.

Задачи исследований:

1. Обосновать применимость метода динамического индентирования для достоверного контроля твердости металлических материалов, в том числе изделий аддитивного производства.

2. Разработать алгоритмическое и программное обеспечение, позволяющее производить переход от исходного сигнала ЭДС к параметрам контактного ударного взаимодействия сферического индентора с испытуемым материалом.

3. Разработать метод оценки объемной динамической твердости, учитывающий взаимосвязь между параметрами контактного ударного взаимодействия и твердостью, а также топографию деформированной поверхности.

4. Провести экспериментальную апробацию разработанных алгоритмов и методов при контроле твердости материалов изделий, в том числе получаемых с использованием технологий селективного лазерного спекания.

Идея работы. Наличие функциональных зависимостей между параметрами контактного ударного взаимодействия и механическими характеристиками материала позволяет усовершенствовать метод динамического индентирования и разработать новое алгоритмическое и программное обеспечение приборов для измерения твердости материалов изделий.

Достоверность результатов определяется корректностью постановки задач исследований; обоснованностью принятых допущений и ограничений; применением теоретически и экспериментально обоснованных физико-математических моделей, используемых при расчетах; результатами экспериментальных исследований и их сходимость с результатами теоретического анализа и компьютерного моделирования; признанием основных положений диссертации широким кругом специалистов при апробировании материалов исследований на конференциях.

Научная новизна работы:

1. Предложена и обоснована новая расчетно-экспериментальная модель движения индентора, позволяющая перейти с учетом обоснованных допущений от исходного сигнала ЭДС магнитоиндукционного преобразователя к аналитическим зависимостям с целью расчета параметров контактного ударного взаимодействия (*временных зависимостей скорости, контактного усилия и глубины внедрения*).

2. Предложена и обоснована новая математическая модель расчета значений твердости исследуемого материала на основе параметров контактного ударного взаимодействия, базирующаяся на оценке объемной динамической твердости и позволяющая учитывать топографию деформируемой поверхности, т.е. эффекты прогиба («sink-in») и навал («pile-up»).

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Алгоритм обработки исходного сигнала ЭДС магнитоиндукционного преобразователя, разработанный на основе предложенной расчетно-экспериментальной модели движения индентора, позволяет с учетом обоснованных допущений строить диаграмму зависимости $F(h)$ и определять значения основных параметров контактного ударного взаимодействия сферического индентора с упругопластическим полупространством: скорости движения индентора в момент начала и завершения контактного ударного; продолжительности процессов активного контактного ударного взаимодействия (нагружения) и пассивного контактного ударного взаимодействия (разгружения); максимальной глубины внедрения индентора и глубины остаточного пластического отпечатка; максимального контактного усилия.

2. Предложенный метод оценки динамической твердости материала позволяет учесть эффекты «sink-in» («прогиб») и «pile-up» («навал»), возникающие при контактном ударном взаимодействии сферического индентора с упругопластическим полупространством, а также позволяет

установить взаимосвязь динамической твердости со стандартизованными шкалами твердости и может быть использован для достоверного контроля твердости материалов изделий, в том числе изготовленных методом селективного лазерного спекания.

Теоретическая и практическая значимость результатов диссертационной работы заключается в разработке и апробации алгоритмического и программного обеспечения, позволяющего автоматизировать процесс оценки основных параметров контактного ударного взаимодействия сферического индентора с упругопластическим полупространством и объемной динамической твердости материалов, создающего возможность оперативного достоверного контроля твердости материалов, в том числе изделий аддитивного производства с использованием метода и средств динамического индентирования.

Методология и методы исследований. Исследования проводились на основе применения теории упругости и пластичности, измерений, методов механики контактного деформирования твердого тела, методов физического и математического моделирования, физического эксперимента, методов статистической обработки результатов экспериментов.

Реализация (внедрение) результатов работы. Результаты диссертационной работы использованы при создании в ООО «НТЦ «Эталон» блока неразрушающего контроля качества сложнопрофильных заготовок и изделий, полученных селективным лазерным спеканием в рамках опытно-конструкторской работы «СЛС-НК/Эталон», который нашел применение при разработке технологий аддитивного производства в АО «Композит».

Результаты работы также использованы при подготовке дисциплины «Испытание материалов» по образовательной программе магистратуры «Технологии интроскопии» на факультете систем управления и робототехники Университета ИТМО.

Личный вклад автора в работу заключается в постановке цели и задач теоретических и экспериментальных исследований, формулировке научных

положений, планировании и проведении экспериментов, обработке полученных результатов экспериментов, разработке алгоритмов и доказательстве их достоверности. Совместно с Р. А. Егоровым, М. В. Кузьмичевым и И. А. Кашаповой разработано программное обеспечение «ПО ДИ1», реализующее алгоритм обработки исходного сигнала ЭДС магнитоиндукционного преобразователя, подана заявка на государственную регистрацию программы для ЭВМ.

Апробация работы. Основные и промежуточные результаты диссертационной работы доложены на IV Международной конференции по инновациям в неразрушающем контроле SibTest (г. Новосибирск, 2017 г.); V Международной конференции по инновациям в неразрушающем контроле SibTest (г. Екатеринбург, 2019 г.); XXX Уральской конференции «Физические методы неразрушающего контроля (Янусовские чтения)» (г. Екатеринбург, 2017 г.); 11-я Международная конференция «Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации» (ARMIMP-2018) (г. Суздаль, 2018 г.); I, II, III Международная молодежная конференция «Информационные технологии и технологии коммуникации: современные достижения» (г. Санкт-Петербург 2018-2020 г.); VII-VIII Конгресс молодых ученых (КМУ) (г. Санкт-Петербург 2018-2020 г.).

Публикации. Результаты диссертационной работы в достаточной степени освещены в 15 печатных работах, в том числе в 4 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), из них в 1 статье - в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования Scopus и Web of Science.

Структура и объем диссертации. Диссертация посвящена решению указанных задач и состоит из введения, четырех разделов и заключения. Общий объем диссертации: 120 страниц печатного текста, список

используемых источников из 77 наименований. В основной состав диссертации входят 18 таблиц и 54 рисунка.

ГЛАВА 1 АНАЛИЗ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ ТВЕРДОСТИ МАТЕРИАЛОВ ИЗДЕЛИЙ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА

1.1 Особенности процесса изготовления изделий по аддитивным технологиям

На сегодняшний день условия современной рыночной экономики обуславливают развитие подходов к производству и эксплуатации ответственных узлов и изделий. В свете ориентированности существующей мировой промышленности на автоматизацию цифрового производства и облачные вычисления, а также новый уровень организации производства и управления на протяжении всего жизненного цикла выпускаемой продукции, эффективность производства определяется возможностью получения различных конкурентных преимуществ. Данный виток развития научно-технического прогресса берет свое начало в 2011 году в Германии и именуется как четвертая промышленная революция.

Четвертая промышленная революция или Индустрия 4.0 (рисунок 1.1) – очередная смена технологического уклада, в которой на первые роли выходят киберфизические процессы [53].

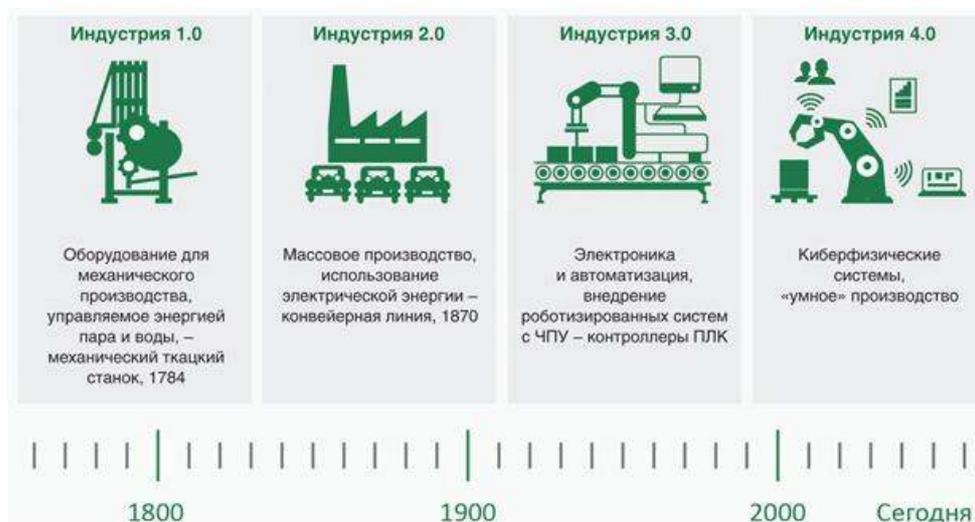


Рисунок 1.1 – Мировые промышленные революции [29]

Индустрия 4.0 оказывает преобразующее воздействие на современную экономику и бизнес-процессы, как в секторе информационных систем, так и за его пределами. Мировая промышленность при этом переходит на новую, автоматизированную ступень.

Основные направления Индустрии 4.0 приведены на рисунке 1.2.

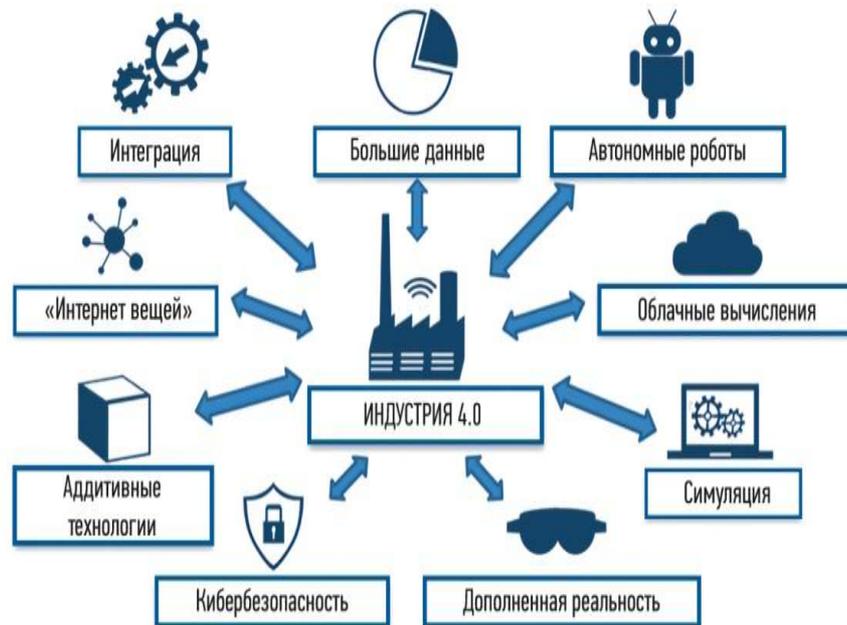


Рисунок 1.2 – Основные направления Индустрии 4.0 [4]

Важнейшими и ключевыми направлениями развития так называемой «Фабрики будущего» являются технологии аддитивного производства (рисунки 1.2-1.3).

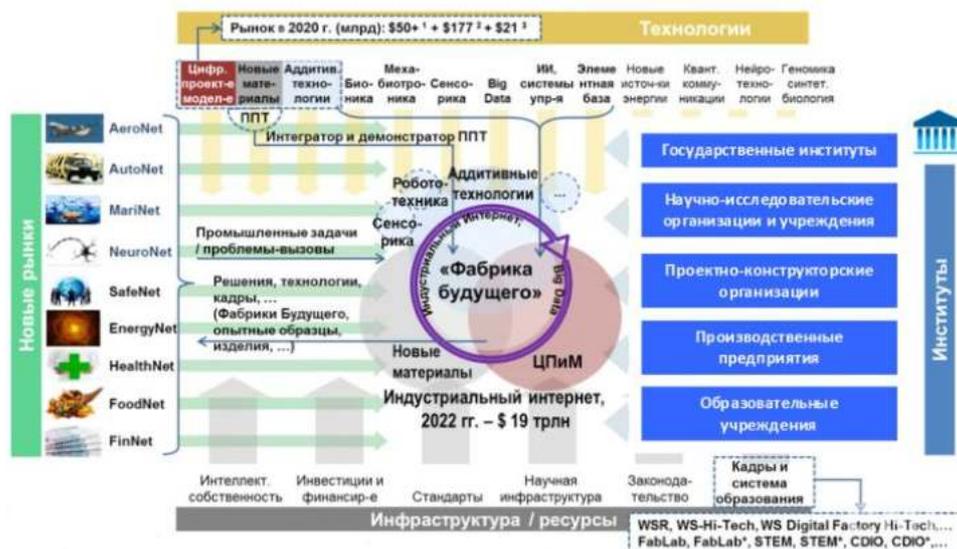


Рисунок 1.3 – Иллюстрация развития «Фабрики будущего» [29]

Крупные авиационные, автомобильные, оборонные, ракетостроительные, приборостроительные предприятия, а также медицина, образование, частный бизнес и другие направления по достоинству оценили преимущества технологий аддитивного производства и активно встраивают такие технологии в свои рабочие процессы [49].

В соответствии с ГОСТ Р 57558-2017 [11] аддитивное производство (additive manufacturing) основано на создании физического объекта с использованием электронной модели путем послойного добавления материала. С использованием технологий аддитивного производства реализуется инновационный подход к формированию материалов нового поколения [47].

Снижение затрат на производство деталей, ответственных узлов и изделий стало одним из ключевых факторов внедрения таких технологий на ведущие предприятия не только в Российской Федерации, но и в мировой промышленности.

Следует выделить и другие преимущества аддитивных технологий, а именно:

- сокращение количества комплектующих частей создаваемых узлов изделия;
- уменьшение количества технологических операций;
- сокращение трудоемкости изготовления;
- сокращение времени изготовления;
- уменьшение массовых характеристик;
- унификация используемых материалов;
- минимизация отходов;
- функциональная надежность конструкции;
- упрощение ремонта и замены узлов изделия.

В настоящее время доступен широкий выбор технологий аддитивного производства. Основные различия технологий заключаются в способе нанесения слоев и используемых расходных материалах. Часть из

рассмотренных методов основано на спекании, плавке или размягчении материалов: сюда входят выборочная лазерная плавка, прямое лазерное спекание металлов, печать методом послойного наплавления и селективное лазерное спекание. Также в настоящее время развивается производство твердых моделей за счет полимеризации жидких материалов, известное как стереолитография [51]. В таблице 1.1 приведен сравнительный анализ рассмотренных в рамках настоящих диссертационных исследований методов и технологий аддитивного производства [52].

Таблица 1.1 – Технологии аддитивного производства [11]

Метод	Технология	Принцип реализации	Материал
Экструзия	Моделирование методом послойного наплавления (Fused Deposition Modeling/FDM) [11]	Создание трехмерных объектов за счет нанесения последовательных слоев материала, повторяющих контуры цифровой модели; как правило, в качестве материалов для печати выступают термопластики, поставляемые в виде катушек нитей или прутков	-термопластики и композиты, поликарбонаты, полиамиды, полистирол, лигнин
Грануляция	Прямое лазерное спекание металлов (Direct Metal Laser Sintering/DMLS)	Использование лазера для спекания частиц порошкообразного материала до образования трехмерного физического объекта. Спекание производится за счет вычерчивания контуров, заложенных в цифровой модели. По завершении сканирования рабочая платформа опускается, и наносится новый слой материала. Процесс повторяется до образования полной модели. Аналогично SLS и DMLS, кроме как используется ни частичная плавка, а полное расплавление металла в твердую однородную массу, необходимую для построения монолитных моделей	-порошковые металлы и сплавы, включая нержавеющую сталь, инструментальную сталь, кобальт-хромовые сплавы, титан, алюминий; -керамические порошковые сплавы; -термопластики
	Выборочное (селективное) лазерное спекание (Selective Laser Sintering/SLS) [11]		
	Выборочная (селективная) лазерная плавка (Selective Laser Melting/SLM) [11]		

Как уже было отмечено, одним из перспективных технологий аддитивного производства является метод селективного лазерного спекания. Лазерное объемное формообразование металлических материалов является развивающимся методом изготовления новых изделий сложной формы и является, во многих случаях, единственной альтернативой традиционным методам изготовления деталей.

Технология СЛС реализует создание металлических изделий из порошка, который спекается с помощью мощного высокоэнергетического лазера в специальных формах. Построение детали ведется в однородной массе порошка. Затем расплавленный материал затвердевает и приобретает необходимую форму. Такой подход значительно облегчает и удешевляет производство сложнопрофильных крупногабаритных изделий.

Основоположниками метода СЛС принято считать докторов Карла Декарда и Джо Бимана [24] (Техасский университет в Остине, 1986 г.).

Однако с 2014 года технология селективного лазерного спекания является общедоступной.

Изначально технология СЛС использовалась для создания моделей из полимерных материалов, однако позже метод повсеместно стал применяться и в порошковой металлургии, где и по сей день занимает одну из ключевых ролей [57]. В основе технологии СЛС лежит принцип воспроизведения модели (детали) послойно. На рисунке 1.4 приведена схема процесса селективного лазерного спекания.

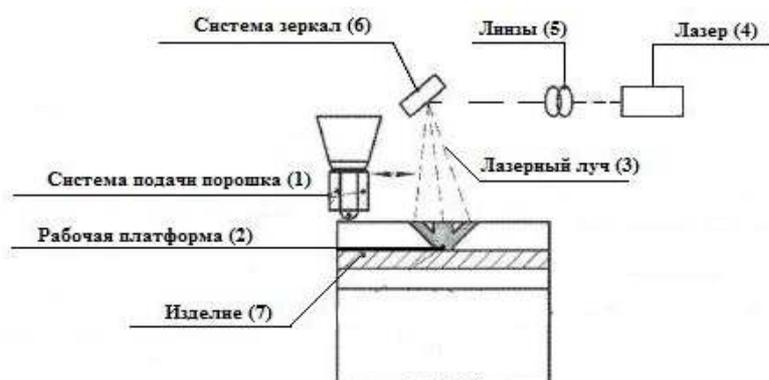


Рисунок 1.4 –Схема процесса селективного лазерного спекания [41]

На рисунке 1.4 проиллюстрирован процесс СЛС: система подачи порошка (1) наносит на рабочую платформу (2) слой порошка заданной толщины. Лазерный луч (3), формируемый лазером (4), линзами (5) и системой зеркал (6), проходит по контуру слоя изготавливаемого изделия (7) (модели), после чего сканирует все пространство, заключенное в этом контуре. Под воздействием лазерного излучения частицы порошка оплавляются или расплавляются полностью, а затем затвердевают, превращаясь в твердую спеченную структуру. Далее система подачи порошка (1) наносит следующий слой, и цикл повторяется [55].

Следует отметить, что процессы селективного лазерного спекания происходят в атмосфере инертного газа во избежание попадания атмосферного кислорода. Также инертный газ позволяет лучше контролировать характеристики спекаемых слоев.

По завершению изготовления всех необходимых слоев изделия, неиспользованные гранулы порошка должны быть удалены с рабочей платформы. Неиспользованный порошок затем может быть повторно использован для создания других изделий по данной технологии [65].

Порошковые металлические материалы наряду с традиционными дефектами имеют специфические, присущие только им, так называемые макроскопические дефекты. Механические свойства таких материалов самым непосредственным образом связаны с наличием в них трещин, пор, включений, межфазных и межзеренных границ и других специфических дефектов. Однако при всем разнообразии номенклатуры, а также причин, обуславливающих их проявление, дефекты изделий, изготовленных по технологии СЛС, можно разделить на три наиболее общих класса: усадочные пустоты (поры), трещины, включения [5].

При этом вышеперечисленные факторы обуславливают необходимость контроля механических свойств материалов изделий селективного лазерного спекания.

Одним из наиболее распространенных способов оценки механических свойств материалов является испытание. В настоящее время в практике механических испытаний материалов применяются их разнообразные виды и методы: на растяжение, сжатие, изгиб и кручение, на ударный изгиб и другие. Отдельного внимания заслуживает испытание материалов на твердость. Твердостью является способность материала сопротивляться вдавливанию в него более твердого тела (индентора) под действием внешних сил [27].

Измерение твердости является одним из наиболее распространенных видов механических испытаний, которое широко применяется как при исследовании механических свойств материалов изделий, так и при контроле их качества в процессе производства и эксплуатации во многих областях промышленности. В отличие от других видов испытаний испытания на твердость достаточно разнообразны и отличаются друг от друга, а именно: условиями приложения нагрузки, форме индентора, времени нагружения, размерами изделия и др. [27].

При этом следует отметить, что в соответствии с [9] контроль механических свойств, в том числе твердости, изделий, выполненных СЛС, необходимо выполнять с использованием образцов-свидетелей. При этом приведенный стандарт устанавливает требования к изготовлению таких образцов, где образец-свидетель должен быть изготовлен в одном производственном цикле с изделием из того же материала. Такие требования накладывают существенные временные и экономические затраты на предприятия-изготовители.

Исходя из изложенного, задача контроля механических свойств материалов изделий, выполненных методом селективного лазерного спекания, в частности контроля твердости, является актуальной.

1.2 Анализ существующих методов и средств для контроля твердости металлических материалов

Как было отмечено ранее, измерение твердости является одним из основных видов механических испытаний, которое нередко применяется на предприятиях-изготовителях.

Существует ряд классификаций методов измерения твердости:

- по способу приложения нагрузки: статические (нагрузка прикладывается плавно) и динамические (нагрузка прикладывается ударно);
- по типу нагружения: вдавливание (индентирования), отскок и царапание (склерометрия);
- по способу измерения значений параметров нагружения: на основе измерения конечных значений параметров нагружения и на основе измерения текущих значений параметров нагружения;
- по максимальным значениям прикладываемой нагрузки F_{max} и глубины индентирования h_{max} .

На практике наибольшее распространение получили следующие классические статические методы измерения твердости (твердометрии): методы измерения твердости по Бринеллю, по Роквеллу, по Виккерсу, метод контроля микротвердости и другие. Однако, являясь образцовыми, они имеют свои существенные недостатки, в первую очередь, связанные с невозможностью обеспечения контроля изделия целиком, не изготавливая образцов-свидетелей. Вместе с тем в настоящее время интенсивно развиваются и динамические методы контроля. Главное достоинство динамических методов контроля заключается в возможности оперативной оценки значений твердости контролируемого материала изделия, не выводя его из строя и не изготавливая при этом образцов-свидетелей.

При контроле твердости также следует учитывать следующие факторы:

- результаты контроля твердости существенным образом зависят от состояния поверхности исследуемого объекта (шероховатости);

- важным фактором, влияющим на точность измерений, являются геометрические и массовые характеристики исследуемого изделия;
- существует необходимость корректировки базовой градуировочной зависимости для каждого конкретного случая, так как получение универсальной градуировочной зависимости или методики контроля затруднительно.

В подавляющем большинстве известных на сегодняшний день методов твердометрии контакт осуществляется вдавливанием в испытуемый материал индентора определенной формы и размера, а оценка твердости производится на основе оценки конечных значений параметров нагружения (геометрических характеристик деформированной области – пластического восстановленного отпечатка: диаметра, глубины, площади поверхности).

В рамках настоящих диссертационных исследований была проведена сравнительная характеристика используемых методов контроля, которые применяются предприятиями-изготовителями при измерении твердости.

Метод Виккерса согласно ГОСТ 2999-75 основан на вдавливании алмазного наконечника в форме правильной четырехгранной пирамиды в испытуемый материал под действием некой нагрузки, приложенной в течение определенного времени, и измерении диагоналей отпечатка, оставшихся на поверхности материала после снятия нагрузки [12].

Испытание на микротвердость вдавливанием по методу восстановленного отпечатка согласно ГОСТ 9450-76 (СТ СЭВ 1195-78) заключается в нанесении на испытуемую поверхность изделия отпечатка под действием статической нагрузки, приложенной к алмазному наконечнику, в течение определенного времени. После удаления приложенной нагрузки и измерения параметров полученного отпечатка, число микротвердости определяется по заданным формулам или табличным значениям [13].

Метод Роквелла согласно ГОСТ 9013-59 основан на измерении глубины внедрения твердого наконечника индентора в испытуемый материал при приложении одинаковой для каждой шкалы твердости нагрузки [14].

Метод Бринелля согласно ГОСТ 9012-59 основан во вдавливании шарика (стального или из твердого сплава) в испытуемый материал под действием усилия, приложенного перпендикулярно к поверхности объекта, в течение определенного времени, и измерении диаметра отпечатка после снятия усилия [15].

Методы Шора согласно ГОСТ 23273-78 заключаются в измерении сопротивления испытуемого материала внедрению в него индентора [16].

Метод кинетического (инструментального) индентирования согласно ГОСТ 56232-2014 основан на записи диаграммы вдавливания упругого шара (шарового индентора) в поверхность испытуемого материала в координатах «нагрузка – глубина» на упругопластической стадии нагружения и разгрузки с выбранной скоростью деформирования [17].

Метод Либа согласно ГОСТ 8.969-2019 основан на определении отношения скоростей бойка при отскоке от поверхности испытуемого материала к скорости бойка при соударении с поверхностью испытуемого материала [18].

Метод определения твердости по Кнупу заключается во вдавливании алмазного наконечника в виде пирамиды с углами α и β между противоположными сторонами, равными $172,5^\circ$ и 130° соответственно, в испытуемый материал под действием приложенной нагрузки (статистической силы) F и после ее снятия измерении длины длинной диагонали d отпечатка, оставшегося на поверхности образца [19].

Метод (шкала) Мооса – десятибалльная шкала, созданная для ориентировочной оценки и сравнения относительной твердости материалов методом царапания.

Приведенные методы твердометрии стандартизованы и имеют, как свои эталоны, так и государственные поверочные схемы.

Методы определения «восстановленной» твердости основаны на оценке параметров восстановленного отпечатка индентирования и разделяются на поверхностную, проекционную и объемную.

В таблице 1.2 представлена результирующая информация рассмотренных методов контроля твердости материалов.

Согласно ГОСТ Р 58419-2019 [9] при контроле твердости изделий, выполненных селективным лазерным спеканием (селективных электронно-лучевым сплавлением) наряду с использованием традиционных методов (по Бринеллю, Роквеллу, Виккерсу и др.) допускается по согласованию с потребителем контроль твердости по ГОСТ Р 56474-2015 [10], который, в свою очередь, регламентирует измерение твердости методом динамического индентирования.

Метод динамического индентирования (ДИ) - один из методов контроля твердости материалов, разработанный в Институте Прикладной Физики Национальной Академии Наук Беларуси. Данный метод позволяет проводить измерения, не используя при этом образцов-свидетелей, что является одним из главных достоинств метода.

В основе метода ДИ лежит непрерывная регистрация процесса контактного ударного взаимодействия индентора с упругопластическим полупространством (испытуемым материалом), а именно изменения текущей скорости движения индентора [30]. Полученный исходный сигнал электродвижущей силы (ЭДС) проходит дальнейшую оцифровку, сглаживание и обработку с помощью заложенных в средство контроля ДИ алгоритмов, для получения значений динамической твердости и других механических характеристик [34]. Также стоит отметить, что метод ДИ сочетает в себе ключевые достоинства других методов твердомерии и индентирования (метод инструментального индентирования и метод измерения твердости по Либу).

Таблица 1.2 – Методы контроля твердости материалов

Образцовые методы контроля		Безобразцовые методы контроля		
Измерение статической твердости		Измерение динамической твердости		
Метод Виккерса ГОСТ 2999-75		Метод определения «восстановленной» твердости		Метод Либа (ГОСТ Р 8.969-2019)
Метод Бринелля ГОСТ 9012-59		Методы оценки поверхностной или проекционной твердости	Методы оценки объемной твердости	
Методы Шора ГОСТ 23273-78		Метод динамического индентирования ГОСТ Р 56474-2015		
Метод Роквелла ГОСТ 9013-59				
Метод Кнупа ГОСТ Р ИСО 4545-1-2015				
Метод измерения микротвердости ГОСТ 9450-76 (СТ СЭВ 1195-78)				
Метод (шкала) Мооса				
Метод кинетического индентирования ГОСТ 56232-2014				

В качестве средств контроля твердометрии в подавляющем большинстве используются стационарные твердомеры, которые предназначены для измерения значений (показателей) твердости непосредственно в лабораторных условиях. При этом важным фактором является устойчивая связь между показателями твердости различных методов твердометрии. При этом существуют известные таблицы переводов показателей твердости из одной шкалы в другую, что позволяет производить корректное сравнение полученных показателей твердости различными методами.

Вместе с тем мировое развитие промышленности, а также требования, формируемые к изготавливаемым изделиям, форсируют и развитие в области их контроля. Так, все более широкое применение находят портативные средства контроля, которые в отличие от стационарных могут применяться как в лабораторных, так и в полевых условиях. Стоит отметить, что, в первую очередь, портативность обеспечивается за счет конструкции датчика, который является одним из важнейших функциональных частей прибора.

Существуют различные типы и классификации датчиков, которые различаются, как по конструкции, так и по способу получения и обработки сигнала. На рисунке 1.5 (а-в) приведен внешний вид существующих средств контроля (стационарных и портативных), используемых при контроле твердости материалов изделий.



а) б) в)
Рисунок 1.5 – Внешний вид средств контроля твердости

В настоящее время крупными изготовителями средств контроля твердости являются: ООО «Константа», NDT Rus, ООО «Метолаб», ООО «НВП «Кропус» и др. [1, 56].

Существующие средства контроля твердости реализуются с использованием различных конструктивных исполнений датчиков и их первичных преобразователей. В настоящих диссертационных исследованиях были рассмотрены первичные преобразователи индукционного типа, которые предназначены для преобразования скорости линейных и угловых перемещений в ЭДС. По принципу действия индукционные первичные преобразователи можно разделить на две группы:

– магнитное сопротивление постоянно, ЭДС наводится за счет перемещения катушки индуктивности (рисунок 1.6 а);

– катушка индуктивности и постоянный магнит неподвижны, ЭДС наводится за счет измерения полного магнитного сопротивления магнитной цепи (рисунок 1.6 в).

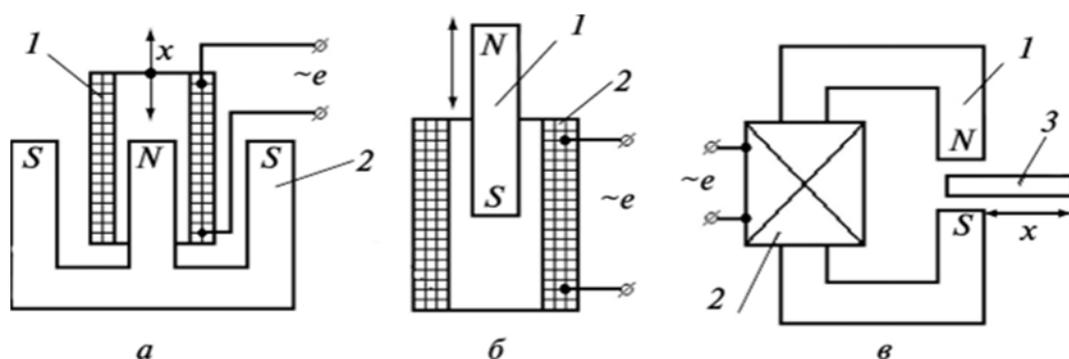


Рисунок 1.6 – Схемы существующих индукционных первичных преобразователей:

1 – постоянный магнит; 2 – катушка индуктивности;
3 – сердечник из магнитного материала

1.3 Современное состояние развития метода динамического индентирования

1.3.1 Основы метода динамического индентирования

Сущность метода динамического индентирования заключается в следующем: нагружение (внедрение / индентирование) осуществляется

посредством ударного механического импульса, при котором процесс контактного взаимодействия индентора с испытуемым материалом является слабо регулируемым, а характер взаимодействия во многом зависит от механических свойств материала. При этом появляется составляющая сопротивления, которая определяется скоростью внедрения индентора. Это означает, что процесс динамического (ударного) внедрения индентора явным образом отличается от статического, а скорость деформации материала влияет на оценку его механических характеристик. Практически для всех материалов увеличение скорости их деформации приводит к повышению характеристик прочности и снижению характеристик пластичности.

Таким образом, при динамическом внедрении появляются дополнительные факторы, оказывающие влияние на достоверную регистрацию процесса контактного ударного взаимодействия индентора с испытуемым материалом, которые могут привести к ошибкам при дальнейших расчетах механических характеристик материала. При статическом внедрении программа нагружения, как правило, задается заранее. В случае же динамического внедрения ударные силы не заданы заранее, а подлежат оценке (регистрации). При некоторых значениях скорости и массы индентора активные силы и ударная реакция могут оказаться сопоставимыми по величине, и пренебрежение этими силами может привести к появлению значительных погрешностей при определении параметров контактного ударного взаимодействия. Учет таких величин, как ударный импульс I , максимальное контактное усилие F_{max} , максимальная глубина внедрения индентора h_{max} , продолжительность активного τ_{act} и пассивного τ_{pas} этапов удара и других параметров контактного ударного взаимодействия, особенно важен для обеспечения достоверной регистрации прибором соответствующих параметров.

Схема приборной реализации метода динамического индентирования приведена на рисунке 1.7.

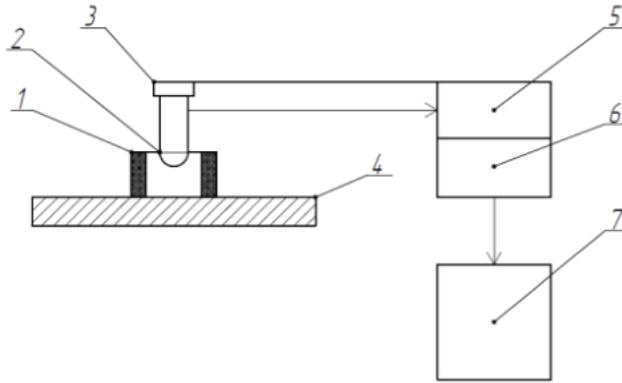


Рисунок 1.7 — Схема приборной реализации метода динамического индентирования:

1 – катушка индуктивности; 2 – индентор; 3 – постоянный магнит;
4 – упругопластическое полупространство; 5 – блок усиления
6 – блок оцифровки; 7 – блок обработки сигнала

На рисунке 1.7: индентор (2), жестко сцепленный с постоянным магнитом (3), внедряясь в упругопластическое полупространство (4), проходит через катушку индуктивности (1), тем самым создавая в последней ЭДС, которая, в свою очередь, пропорциональна скорости движения индентора на всем временном интервале его контактного ударного взаимодействия с испытуемым материалом изделия. Далее ЭДС через блок усиления (5) передается на блок обработки сигнала (7) для дальнейшей обработки.

При этом следует отметить, что ЭДС соотносится со скоростью движения индентора согласно следующей зависимости (1.1):

$$\varepsilon(t) = kV(t), \quad (1.1)$$

где k – коэффициент пропорциональности, В/м/с.

Обработка текущих значений сигнала ЭДС позволяет получать такие временные зависимости, как: изменение скорости движения индентора $V(t)$, изменение контактного усилия $F(t)$ и изменение перемещения индентора (глубины внедрения индентора) $h(t)$, согласно выражениям (1.2-1.4) [31]:

$$V(t) = \frac{\varepsilon(t)}{k}; \quad (1.2)$$

$$F(t) = -m \frac{dV(t)}{dt}; \quad (1.3)$$

$$h(t) = \int_{t_0}^t V(\tau) d\tau. \quad (1.4)$$

где m – масса ударника, кг;

t_0 – время начала контактного ударного взаимодействия индентора и испытываемого материала.

Типовые графики зависимостей $\varepsilon(t)$, $V(t)$, $F(t)$ и $h(t)$, получаемые при динамическом индентировании с использованием прибора «ИСПГ-1», приведены на рисунках 1.8 (а-г).

На рисунках 1.8 (а-г) использованы следующие обозначения:

– $\varepsilon_0 = \varepsilon(t = t_0)$ и $V_0 = V(t = t_0)$ – ЭДС и скорость движения индентора в момент времени t_0 , соответствующий началу контакта индентора с испытываемым материалом;

– $\varepsilon_{1*} = \varepsilon(t = t_1^*)$ и $V_{1*} = V(t = t_1^*)$ – ЭДС и скорость движения индентора в момент времени t_1^* , соответствующий максимальному контактному усилию;

– $\varepsilon_1 = \varepsilon(t = t_1) = 0$ и $V_1 = V(t = t_1) = 0$ – ЭДС индукции и скорость движения индентора в момент времени t_1 , соответствующий максимальной глубине внедрения индентора в испытываемый материал;

– $\varepsilon_2 = \varepsilon(t = t_2)$ и $V_2 = V(t = t_2)$ – ЭДС индукции и скорость движения индентора в момент времени t_2 , соответствующий завершению контакта индентора с испытываемым материалом.

Таким образом, результаты обработки регистрируемой исходной измерительной информации, а именно текущих значений ЭДС $\varepsilon(t)$ и моментов времени t контактного ударного взаимодействия индентора с испытываемым материалом по выражениям (1.1-1.4), позволяют определить значения основных параметров контактного ударного взаимодействия индентора с упругопластическим полупространством.

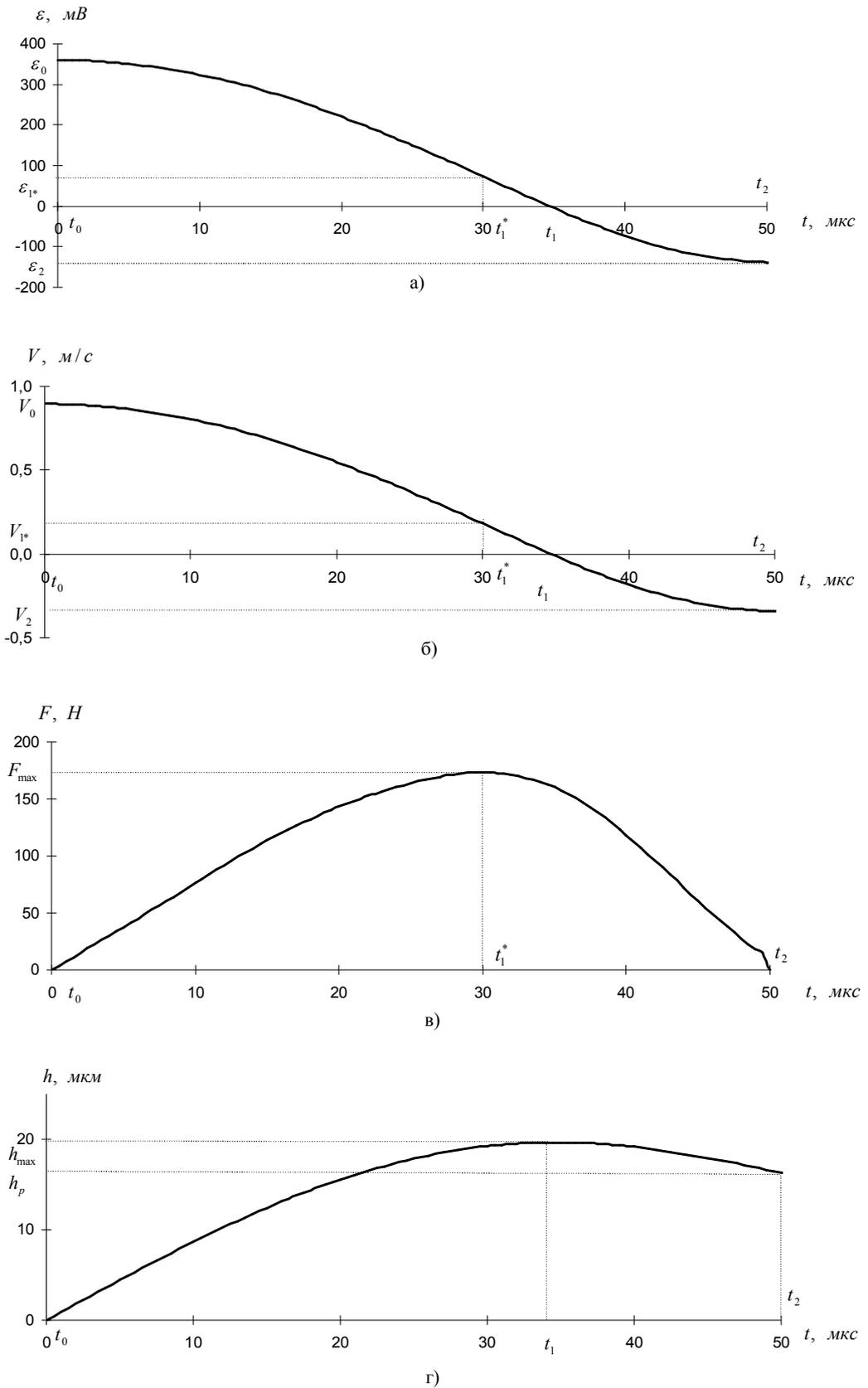


Рисунок 1.8 – Графики характерных зависимостей при динамическом индентировании
а) $\varepsilon(t)$, б) $V(t)$, в) $F(t)$, г) $h(t)$

Основными параметрами, в числе прочих, являются:

- F_{max} - максимальное контактное усилие;
- h_{max} - максимальная глубина внедрения индентора;
- $h_p = h(t = t_2)$ - остаточная глубина внедрения индентора [27];
- $e = \frac{V_{max}}{V_{min}}$ - коэффициент восстановления скорости;
- $\tau_{act} = t_1 - t_0$ - продолжительность активного этапа удара;
- $\tau_{pas} = t_2 - t_1$ - продолжительность пассивного этапа удара [27].

Совместное рассмотрение зависимостей $F(t)$ и $h(t)$ позволяет получить зависимость $F(h)$, диаграмма которой представлена на рисунке 1.9.

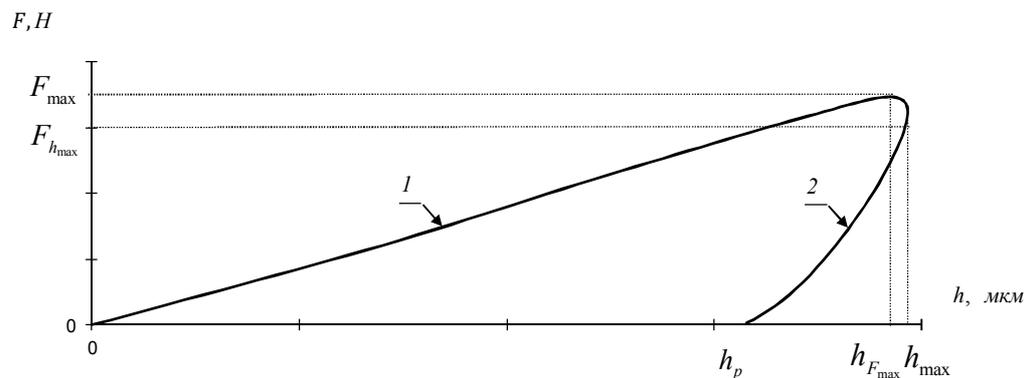


Рисунок 1.9 - Зависимость контактного усилия от глубины внедрения индентора:

1 – этап нагружения, 2 - этап разгрузки;

$F_{max}, h_{F_{max}}$ – максимальное контактное усилие и глубина внедрения индентора при F_{max} ;
 $h_{max}, F_{h_{max}}$ – максимальная глубина внедрения индентора и контактное усилие при h_{max} ;
 h_p – остаточная глубина отпечатка после индентирования [27];

Стоит отметить, что для корректного определения значений механических характеристик исследуемого материала необходимо как можно более точно определять границы и переходы приведенных выше этапов индентирования. Более того важен и учет дополнительных параметров восстановленного отпечатка, таких как, характер контактной топографии поверхности материала при ударном внедрении и др. [26].

Существующий прибор (средство контроля) динамического индентирования основан на реализации метода поверхностной оценки «восстановленной» твердости. Согласно [10] динамическая твердость определяется как отношение значения контактной силы, соответствующей

максимальной глубине внедрения индентора, к площади поверхности отпечатка в соответствии с выражениями (1.5) или (1.6) [27]:

$$HD_{IT}^{(S)} = \frac{F_{hmax}}{2\pi R h_p} \quad (1.5)$$

$$HD_{IT}^{(S)} = \frac{F_{hmax}^2}{2\pi R m (V_{max}^2 - V_{min}^2)}, \quad (1.6)$$

где R - радиус индентора, м;

m – масса индентора, кг;

V_{max} - скорость индентора в момент времени, соответствующий началу контактного взаимодействия индентора с испытываемым материалом [26], м/с;

V_{min} - скорость индентора в момент времени, соответствующий завершению контактного взаимодействия с материалом [26], м/с.

Данный подход к определению твердости материала можно назвать обобщающим термином - оценка поверхностной динамической твердости.

На сегодняшний день приборы динамического индентирования выполнены в нескольких вариациях. Различают приборы ДИ, как по принципу исполнения датчиков и первичных преобразователей, так и по степени «мобильности» всего средства контроля.

1.3.2 Анализ существующих первичных преобразователей

Первичные преобразователи датчиков ударного типа должны обеспечивать следующее [20]:

- широкие диапазоны воспроизводимого ударного ускорения по пиковому значению и длительности действия;
- максимальное соответствие воспроизводимого закона изменения ударного ускорения во времени заданному закону;
- стабильность параметров воспроизводимого ударного процесса;
- минимальные побочные воздействия на испытываемое изделие;
- воспроизводимость процесса испытаний, исключаящую неоднозначность получаемых результатов;

- простоту и удобство в управлении заданным испытательным режимом, возможность ручного и автоматического управления;
- максимальную автоматизацию и механизацию операций, применение в управлении режимами, контроле и регистрации параметров, обработке результатов;
- проведение испытаний в короткие сроки и с минимальными затратами [20].

При существующем многообразии различных возможных схем датчиков в настоящих диссертационных исследованиях были рассмотрены следующие варианты исполнения:

- с принудительным разгоном ударника (например, посредством пружины) – эскиз схемы датчика приведен на рисунке 1.10;
- с гравитационным разгоном ударника (ударник разгоняется посредством силы тяжести) - эскиз схемы датчика приведен на рисунке 1.11.

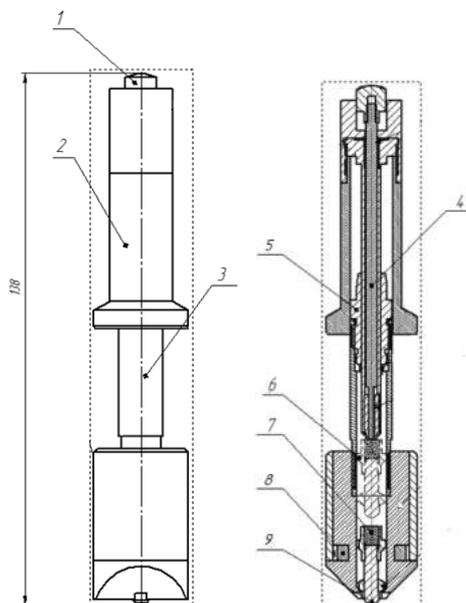


Рисунок 1.10 – Эскиз датчика ударного взаимодействия с принудительным разгоном индентора:

- 1 – пусковая кнопка, 2 – корпус внешний, 3 – направляющая трубка,
 4 – ударник, 5 – ударная пружина, 6 – корпус индентора,
 7 – магнит, 8 – катушка, 9 – индентор

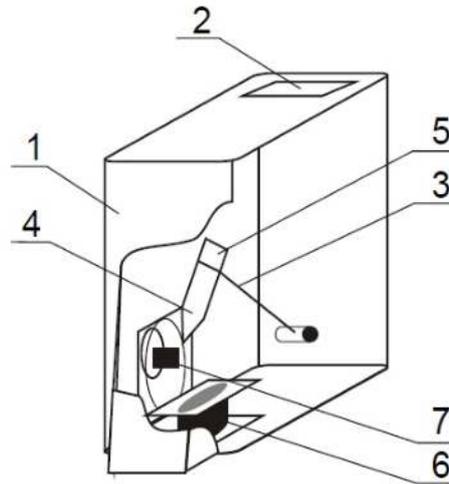


Рисунок 1.11 – Эскиз датчика ударного взаимодействия с гравитационным разгоном индентора:

1 – корпус, 2 – пусковая кнопка, 3 – поворотный рычаг, 4 – индентор, 5 – магнит, 6 – катушка индуктивности. 7 – заводная головка

Датчики со свободным падением ударника (гравитационным разгоном) отличаются простотой конструкции. Основным их достоинством является постоянство ударного ускорения, равного ускорению свободного падения, действующего на ударник на участке предварительного разгона, при получении требуемой начальной скорости контактного ударного взаимодействия. Однако область применения ударных датчиков с гравитационным разгоном ударника ограничена по причине их конструктивных характеристик.

В случае же принудительного разгона ударника массой m пружиной, имеющей жесткость c , предварительную деформацию Δl , и дальнейшего свободного падения с некоторой известной высоты l (рисунок 1.12), его скорость V_0 в момент соприкосновения с поверхностью испытуемого изделия может быть определена по (1.7):

$$V_0 = \sqrt{\frac{c}{m} \Delta l^2 + 2g(l + \Delta l)}, \quad (1.7)$$

где c – коэффициент жесткости пружины, Н/м;

m – масса ударника, кг;

Δl – предварительная деформация пружины, м;

l – расстояние от поверхности индентора ударника до поверхности испытуемого изделия в момент начала его свободного движения, м;

g – ускорение свободного падения, м/с².

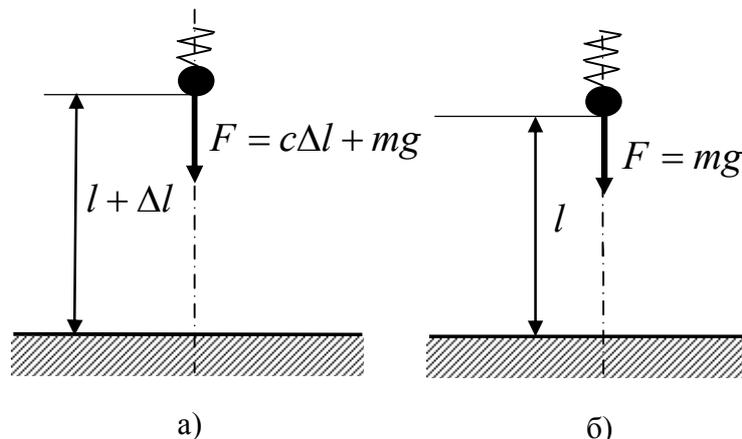


Рисунок 1.12 – Схема принудительного разгона ударника:
а) принудительный разгон индентора, б) свободное падение индентора

С учетом направления вектора скорости движения ударника (направления удара) в пространстве его скорость V_0 в момент соприкосновения с поверхностью испытуемого изделия может быть определена по (1.8):

$$V_0 = \sqrt{\frac{c}{m} \Delta l^2 + 2g(l + \Delta l) \cos \alpha}, \quad (1.8)$$

где α – угол между направлением вектора скорости движения ударника и силы тяжести, рад.

Если же в датчике реализован гравитационный разгон индентора по дуге окружности с радиусом r , при этом центр масс ударника находится на известной высоте l (рисунок 1.13), то его скорость V_0 в момент соприкосновения с поверхностью испытуемого изделия при допущении отсутствия сил трения может быть рассчитана по формуле (1.9):

$$V_0 = r \sqrt{\frac{2mgl}{J}}, \quad (1.9)$$

где r – длина стержня;

m – масса ударника;

g – ускорение свободного падения;

l – расстояние от центра масс ударника до поверхности испытуемого изделия;

J – момент инерции ударника относительно оси, проходящей через точку O узла вращения стержня.

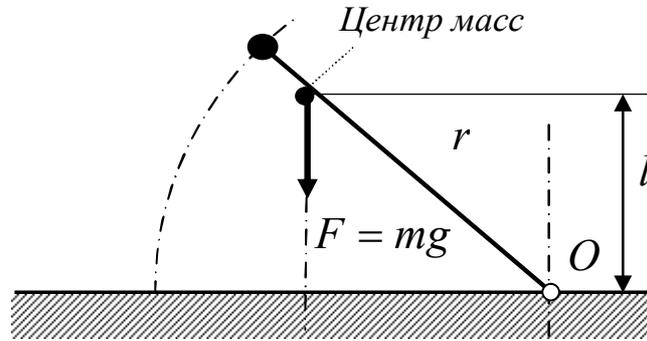


Рисунок 1.13 – Схема гравитационного разгона ударника

Далее можно определить коэффициент k по (1.10):

$$k = \frac{\varepsilon_0}{r \sqrt{\frac{2mgl}{J}}} \quad (1.10)$$

и произвести переход от регистрируемой первичным преобразователем ЭДС $\varepsilon(t)$ к текущей скорости движения индентора $V(t)$ (1.11):

$$V(t) = \varepsilon(t) \frac{r \sqrt{\frac{2mgl}{J}}}{\varepsilon_0}. \quad (1.11)$$

Так как масса m ударника включает в себя массу m_1 индентора с постоянным магнитом и массу m_2 стержня, то при $m_1 \gg m_2$, с достаточной степенью точности, скорость V_0 можно определить по формуле (1.12):

$$V_0 = \sqrt{2gl}, \quad (1.12)$$

где g – ускорение свободного падения;

l – расстояние от поверхности индентора до поверхности испытуемого изделия.

Соответственно расчет коэффициента k представляется в виде зависимости (1.13):

$$k = \frac{\varepsilon_0}{\sqrt{2gl}}. \quad (1.13)$$

Несмотря на возможность достаточно точного определения коэффициента k , к одному из основных недостатков конструкции датчиков с гравитационным разгоном индентора необходимо отнести возможность осуществления контроля только при нанесении удара «в пол» или при незначительном отклонении от вертикали, что значительно сужает область применения датчиков такого типа, а также номенклатуру испытываемых изделий.

При этом также, следует отметить, что значение коэффициента k и точность его оценки существенным образом зависит от принципа разгона индентора, который в свою очередь определяет конструкцию датчика, обеспечивающего стабильность и точность работы прибора динамического индентирования. Поэтому в перспективе рациональным был бы учет точности определения данного параметра в алгоритмах перехода от ЭДС к скорости движения индентора, а далее и к другим параметрам контактного ударного взаимодействия.

Пределы текучести, прочности, характеристики упрочнения материалов зависят от скорости их деформации. Аналитические подходы к оценке данных механических характеристик, учитывающие скорость деформации, представлены в работах многих авторов. Однако инженерные подходы, позволяющие наиболее точно описать процесс ударного индентирования при переменных скоростях деформации, на сегодняшний день недостаточно развиты. При этом сигнал ЭДС, регистрируемый преобразователем, является сочетанием истинного отклика на изменение скорости, инерциальной нагрузки и колебаний. Первый компонент является информативным сигналом, но второй и третий компоненты искажают его.

В связи с этим описание деформационного поведения материалов при индентировании и правильный выбор точек переходных процессов также является актуальной задачей для дальнейших исследований.

1.3.3 Анализ существующих средств контроля динамического индентирования

На рисунке 1.14 приведен прибор динамического индентирования, состоящий из датчика с гравитационным разгоном ударника, блока приема и обработки исходного сигнала и блока отображения информации на основе персонального компьютера (ПК).



Рисунок 1.14 – Внешний вид прибора динамического индентирования, исполнение 1

На рисунке 1.15 приведен прибор ДИ, состоящий из датчика с принудительным разгоном ударника (1), блока приема и обработки исходного сигнала (2) и блока отображения информации на основе ПК.



Рисунок 1.15 – Внешний вид прибора динамического индентирования, исполнение 2

Как видно из рисунков 1.14-1.15, второе исполнение прибора является более мобильным и, как следствие, более пригодным к использованию в «полевых» условиях. Однако выбор исполнения прибора ДИ, также, как и выбор датчика обуславливается условиями проведения испытаний, а также конкретными поставленными задачами.

Существенный вклад в развитие метода динамического индентирования внесли следующие авторы: А.П. Крень [30, 31, 32, 43, 44], В.А. Рудницкий [7, 31, 32, 35, 45, 46,], Г.А. Ланцман [32, 43, 44], А.В. Рабцевич [45], О.В. Мацулевич [35], Е.В. Гнутенко [7], Т.А. Протасеня [34, 48].

Также за годы развития методов твердомерии, в целом, было опубликовано значительное количество работ широкого круга авторов, таких как: М.С. Дрозд [25], В.И. Мощенок [38], Ю.В. Мильман [36, 37, 69], П.М. Огар [39-40], А.И. Потапов [42] В.А. Сясько [6, 42, 49], К.В. Гоголинский [1, 6, 42, 49, 57], Н. Lee [65], G.M. Pharr, [65, 72, 77], W.C.Oliver [72, 77] и др.

1.4 Выводы по главе 1

1. Рассмотрены предпосылки перехода от традиционного механообрабатывающего производства металлических изделий к перспективным технологиям аддитивного производства. Приведен анализ существующих методов изготовления изделий по аддитивным технологиям с учетом особенностей таких изделий.

2. Обоснована важность проведения испытаний по контролю твердости, как при изготовлении, так и в процессе эксплуатации изделий аддитивного производства. Приведен анализ существующих методов и средств контроля твердости металлических материалов.

3. Обоснована актуальность применения метода динамического индентирования для контроля твердости металлических материалов. Отмечено современное состояние развития метода динамического индентирования в мире и в России, а также выделены области, нуждающиеся в дальнейшем развитии.

Задачи исследований:

1. Разработать алгоритмическое и программное обеспечение, позволяющее производить переход от исходного сигнала ЭДС к параметрам контактного ударного взаимодействия сферического индентора с испытуемым материалом.

2. Разработать метод оценки объемной динамической твердости, учитывающий взаимосвязь между параметрами контактного ударного взаимодействия и твердостью, а также топографию деформированной поверхности.

3. Провести экспериментальную апробацию разработанных алгоритмов и методов при контроле твердости материалов изделий, в том числе получаемых с использованием технологий селективного лазерного спекания.

ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМИЧЕСКОГО И ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ОБРАБОТКИ ИСХОДНОГО СИГНАЛА МАГНИТОИНДУКЦИОННОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ПРИ КОНТАКТНОМ УДАРНОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ

2.1 Теоретические основы расчета параметров контактного ударного взаимодействия индентора с упругопластическим полупространством

Рассматривая процесс контактного ударного взаимодействия жесткого сферического индентора с упругопластическим полупространством, следует отметить, что получаемая в результате динамического индентирования диаграмма зависимости контактного усилия от глубины внедрения индентора $F(h)$ содержит следующие характерные кривые: кривую нагружения и кривую разгрузки (рисунок 2.1, поз. 1 и поз. 2 соответственно).

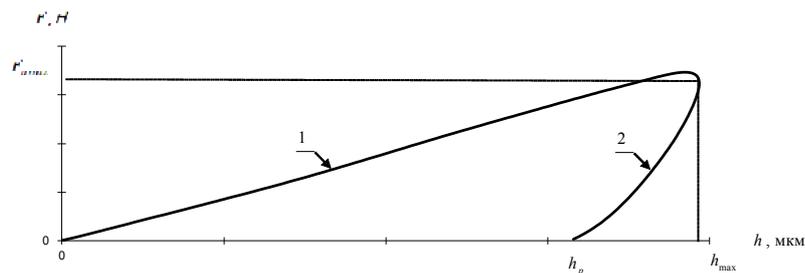


Рисунок 2.1 – Диаграмма зависимости контактного усилия от глубины внедрения индентора:
 1 – кривая нагружения; 2 – кривая разгрузки;
 F_{max} – максимальное контактное усилие;
 h_{max} – максимальная глубина внедрения индентора;
 h_p – остаточная глубина внедрения индентора

Процесс нагружения (активного контактного ударного взаимодействия) характеризуется двумя последовательными стадиями: упругое и упругопластическое внедрение индентора. Упругая стадия внедрения проходит в самом начале ударного процесса, при этом под индентором не образуются пластические деформации [27]. После достижения внутренними напряжениями предельного упругого состояния происходит зарождение пластической деформации внутри объема полупространства. Далее на всем

этапе нагружения имеет место упругопластическая деформация [27], сопровождающаяся необратимым рассеянием (потерей) механической энергии и ее превращением во внутреннюю энергию. Процесс нагружения продолжается до достижения контактного усилия и глубины внедрения индентора максимальных значений [27].

Следует отметить, что продолжительность стадии упругого внедрения индентора не превышает 2% от продолжительности стадии упругопластического внедрения, поэтому при дальнейшем рассмотрении ей можно пренебречь.

Тогда, описывая процесс упругопластического внедрения сферического индентора (2.1):

$$F_1(h) = c_1 h^{\alpha_1} = c_1 h, \quad (2.1)$$

где c_1 – константа, характеризующая испытуемый материал;

α_1 – показатель степени, зависящий от характера взаимодействия и геометрии (формы) индентора (для упругопластического взаимодействия и сферического индентора $\alpha_1 = 1$);

После достижения контактного усилия и глубины внедрения индентора максимальных значений начинается процесс разгрузки (пассивного контактного ударного взаимодействия), для которого характерной является стадия упругой деформации. Завершению данного процесса соответствует образование остаточного пластического отпечатка глубиной h_p (остаточная глубина внедрения индентора).

Функция $F_2(h)$, описывающая кривую разгрузки 2, аналогично (2.1) может быть представлена выражением (2.2):

$$F_2(h) = c_2 (h - h_p)^\beta = c_2 (h - h_p)^{1,5}, \quad (2.2)$$

где c_2 – константа, характеризующая испытуемый материал

β – показатель степени, зависящий от характера взаимодействия и геометрии (формы) индентора (для упругого взаимодействия и сферического индентора $\beta = 1,5$).

Таким образом, кривая нагружения характеризует сопротивление материала внедрению жесткого индентора и отражает упругопластические свойства исследуемого материала, а кривая разгрузки, главным образом, упругие свойства материала.

Следует отметить, что площади под различными ветвями диаграммы $F(h)$ (рисунок 2.1) соответствуют определенным значениям работы, затрачиваемой на различные виды деформации материала (упругая, пластическая и их сочетание), при контактном ударном взаимодействии индентора с упругопластическим полупространством. При этом вклады каждой из этих работ в суммарную работу деформирования являются отражением механических свойств материала изделия.

Ударник, который включает в себя непосредственно сферический индентор радиуса R , магнит и связывающую их конструкцию, имеет массу m и контактирует с упругопластическим полупространством с начальной скоростью V_0 , перпендикулярной его поверхности.

Отметим допущения, которые принимались при моделировании контактного ударного взаимодействия в настоящих диссертационных исследованиях:

- рассматривается однородное, изотропное тело, подвергаемое упругопластическому деформированию;
- остаточные напряжения в исследуемом объекте отсутствуют;
- в процессе контактного ударного взаимодействия отсутствуют: адиабатический нагрев, трение, термическое размягчение, локализация деформации и фазовые превращения.

Тогда при контактном ударном взаимодействии индентора с упругопластическим полупространством его движение описывается вторым законом Ньютона (2.3):

$$m\ddot{h} + F = 0, \quad (2.3)$$

где m – масса ударника, кг;

$$\ddot{h} = \frac{d^2h}{dt^2} \text{ – ускорение движения индентора, м/с}^2;$$

F – контактное усилие, Н.

Уравнение движения индентора в процессе нагружения описывается выражением (2.4):

$$m\ddot{h} + c_1 h = 0, \quad (2.4)$$

где c_1 – константа, Н/м.

Принимая следующие начальные условия (2.5-2.9):

$$t_0 = 0 \leq t \leq t_1; \quad (2.5)$$

$$h(t_0 = 0) = 0; \quad (2.6)$$

$$\dot{h}(t_0 = 0) = V_0; \quad (2.7)$$

$$h(t_1) = h_{max}; \quad (2.8)$$

$$\dot{h}(t_1) = V_1 = 0, \quad (2.9)$$

где $\dot{h} = \frac{dh}{dt}$ – скорость движения индентора, м/с;

$t_0 = 0$ – момент времени начала взаимодействия, с;

t_1 – момент времени, при котором скорость движения индентора $V_1 = 0$, и соответствующий максимальным значениям контактного усилия и глубины внедрения индентора F_{max} и h_{max} , с;

V_0 – скорость движения индентора в момент времени начала взаимодействия, м/с;

h_{max} – максимальная глубина внедрения индентора, м.

Решая уравнение (2.4), получаем аналитические зависимости для расчета скорости и глубины внедрения индентора на этапе упругопластического нагружения (2.10-2.11):

$$V(t) = V_0 \cos\left(\sqrt{\frac{c_1}{m}} t\right); \quad (2.10)$$

$$h(t) = V_0 \sqrt{\frac{m}{c_1}} \sin\left(\sqrt{\frac{c_1}{m}} t\right). \quad (2.11)$$

С использованием зависимости (2.11) можно определить следующие аналитические зависимости для оценки параметров контактного ударного взаимодействия индентора с упругопластическим полупространством:

– функцию контактного усилия $F_1(t)$ (2.12):

$$F_1(t) = -m\ddot{h} = mV_0 \sqrt{\frac{c_1}{m}} \sin\left(\sqrt{\frac{c_1}{m}} t\right); \quad (2.12)$$

– продолжительность процесса активного контактного ударного взаимодействия (нагружения) $\tau_{act} = t_1 - t_0$ (2.13):

$$\tau_{act} = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{m}{c_1}}. \quad (2.13)$$

Значение скорости движения индентора в момент времени начала контактного ударного взаимодействия V_0 рассчитывается по формуле ($V_0 = \frac{\varepsilon_0}{k}$), в которой ε_0 принимается по результату измерения.

Значение c_1 определяется из формулы (2.13) и выглядит (2.14):

$$c_1 = m \cdot \left(\frac{\pi}{2 \cdot \tau_{act}}\right)^2. \quad (2.14)$$

Уравнение движения индентора в процессе разгрузки описывается выражением (2.15):

$$m\ddot{h} + c_2(h - h_p)^{1,5} = 0. \quad (2.15)$$

Принимая следующие начальные условия (2.16-2.20):

$$t_1 \leq t \leq t_2; \quad (2.16)$$

$$h(t_1) = h_{max}; \quad (2.17)$$

$$\dot{h}(t_1) = 0, \quad (2.18)$$

$$h(t_2) = h_p; \quad (2.19)$$

$$\dot{h}(t_2) = V_2; \quad (2.20)$$

где t_2 – момент времени завершения контактного взаимодействия [26], с;

V_2 – скорость движения индентора в момент времени соответствующего завершению контактного ударного взаимодействия [26], м/с;

h_p – остаточная глубина внедрения индентора или глубина остаточного пластического отпечатка, м,

и используя уравнение сохранения энергии (2.21):

$$\frac{m\dot{h}^2}{2} - \frac{mV_2^2}{2} = -\frac{c_2}{2,5}(h - h_p)^{2,5}, \quad (2.21)$$

можно получить выражение для функции $h(t)$ (2.22):

$$h(t) = h_p + \left(1,25 \frac{m}{c_2} (V_2^2 - [V(t)]^2) \right)^{0,4}. \quad (2.22)$$

Совместно решая уравнения (2.2) и (2.15), получаем аналитические зависимости для расчета скорости, глубины внедрения индентора и контактного усилия на этапе упругого разгрузки (2.23-2.25):

$$V(t) = \frac{\varepsilon(t)}{k}, \quad (2.23)$$

$$h_2(t) = (1,25 \cdot m \cdot (V_2^2 - V(t)^2) / c_2)^{0,4} + h_p, \quad (2.24)$$

$$F_2(t) = c_2 \cdot (h(t) - h_p)^{1,5}. \quad (2.25)$$

При этом, принимая $h = h_{max}$, остаточная глубина внедрения индентора h_p , рассчитывается по (2.26):

$$h_p = h_{max} - 1,25 \frac{mV_2^2}{c_1 h_{max}}, \quad (2.26)$$

значение постоянной c_2 по выражению (2.27):

$$c_2 = \frac{c_1 h_{max}}{(h_{max} - h_p)^{1,5}}. \quad (2.27)$$

Проверку точности определения параметров контактного ударного взаимодействия предлагается проводить на основе уравнения сохранения импульса силы при ударе (2.28):

$$mV_0 = \int_0^{t_1} F_1(t) dt = F_1(t') \cdot \tau_{act}, \quad (2.28)$$

где $F_1(t')$ – среднее контактное усилие (согласно теореме о среднем определенном интеграла), Н;

t' – момент времени соответствующий среднему контактному усилию $F_1(t')$, определяемый по выражению (2.29):

$$t' = \sqrt{\frac{m}{c_1}} \arcsin\left(\frac{2}{\pi}\right). \quad (2.29)$$

Расчет среднего контактного усилия $F_1(t')$ производится по формуле (2.30).

$$F_1(t') = -m\ddot{h} = mV_0 \sqrt{\frac{c_1}{m}} \sin\left(\sqrt{\frac{c_1}{m}} t'\right). \quad (2.30)$$

2.2 Алгоритм и программное обеспечение обработки исходного сигнала магнитоиндукционного преобразователя при контактном ударном взаимодействии

2.2.1 Алгоритм обработки исходного сигнала магнитоиндукционного преобразователя

Для экспериментальной реализации теоретических основ расчета параметров контактного ударного взаимодействия индентора с упругопластическим полупространством, описанных в пункте 2.1, был разработан алгоритм обработки исходного сигнала магнитоиндукционного преобразователя при контактном ударном взаимодействии (последовательность действия для оценки параметров контактного ударного взаимодействия).

Разработанный алгоритм учитывает этапы контактного ударного взаимодействия: этап нагружения (рисунок 2.1, поз. 1) и этап упругого разгружения (рисунок 2.1, поз. 2).

На рисунках 2.2 – 2.5 представлена блок-схема разработанного алгоритма.

Рисунок 2.2 иллюстрирует процесс последовательность действий при регистрации исходного сигнала ЭДС с датчика ДИ с учетом коэффициента пропорциональности k (датчик с гравитационным разгоном индентора), определении границ активного и пассивного этапов контактного ударного взаимодействия и их выделение в массиве.

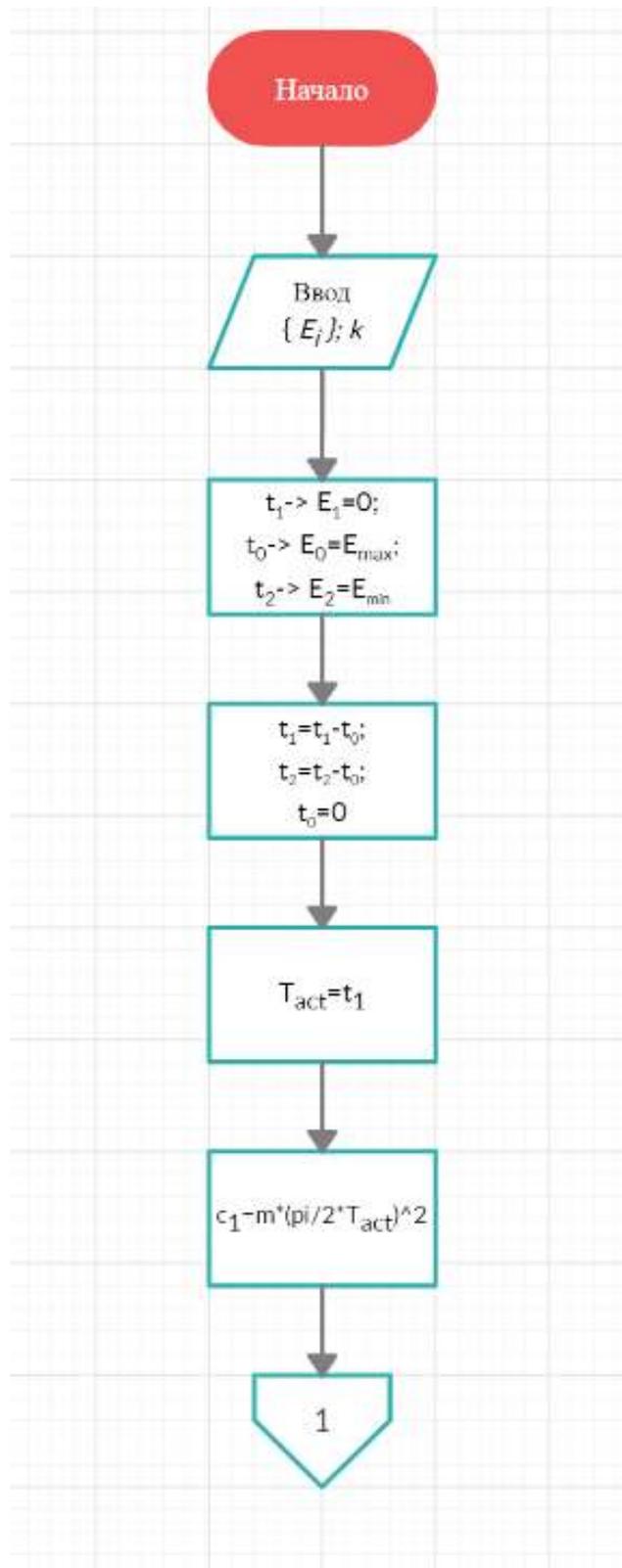


Рисунок 2.2 – Блок-схема алгоритма расчета параметров контактного ударного взаимодействия (часть 1)

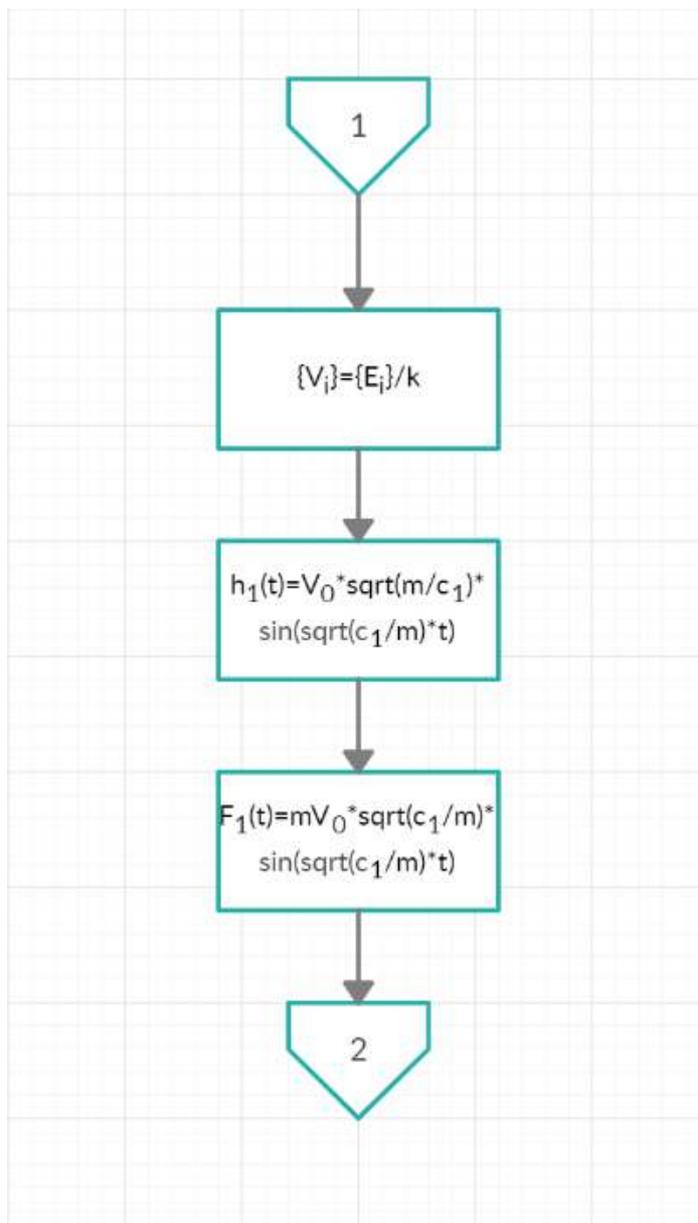


Рисунок 2.3 – Блок схема алгоритма расчета параметров контактного ударного взаимодействия (часть 2)

Рисунок 2.3 иллюстрирует последовательность действий при переходе от значений ЭДС, полученных с помощью магнитоиндукционного преобразователя, к значениям скорости индентора в каждый момент времени взаимодействия его с упругопластическим полупространством через заранее заданный коэффициент пропорциональности k . Также на данном этапе идет аналитическое описание кривой нагружения (рисунок 2.1, поз. 1).

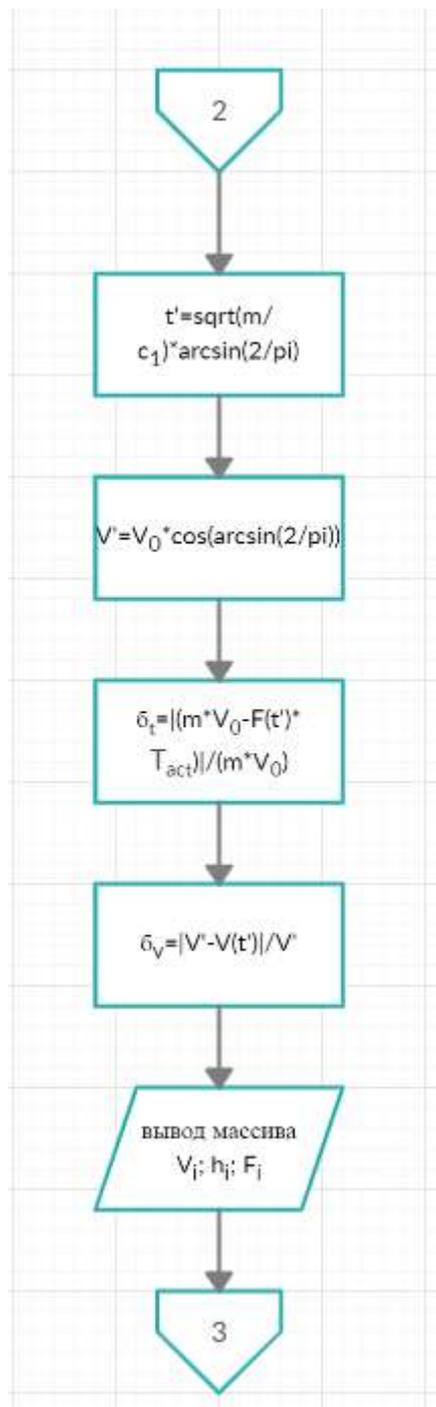


Рисунок 2.4 – Блок схема алгоритма расчета параметров контактного ударного взаимодействия (часть 3)

Рисунок 2.4 иллюстрирует последовательность действий при формировании массива данных кривой нагружения, а также при проведении проверок его корректности с использованием закона сохранения импульса и запись полученного массива данных.

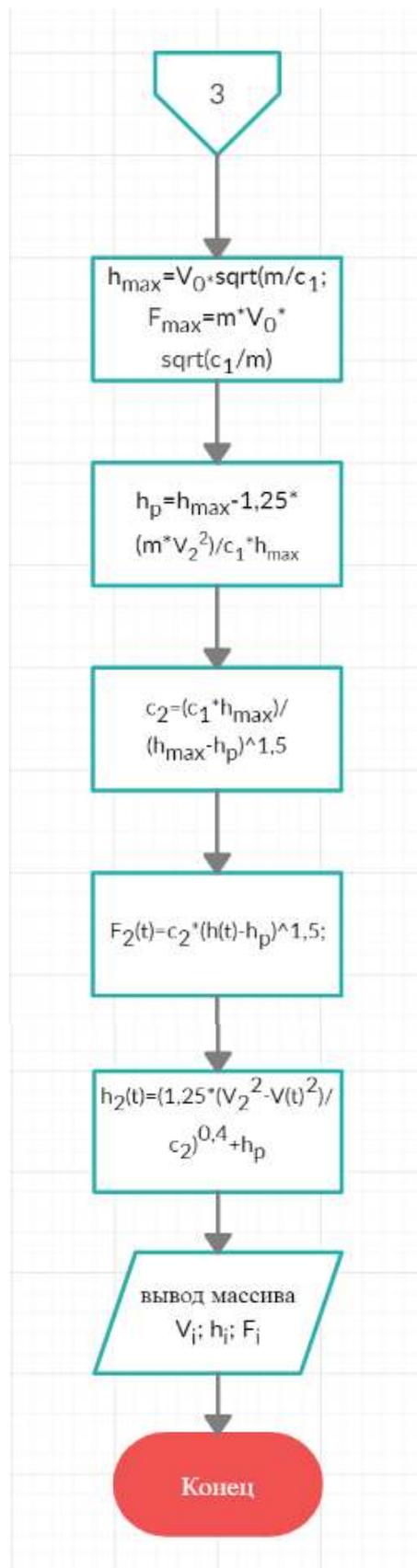


Рисунок 2.5 – Блок схема алгоритма расчета параметров контактного ударного взаимодействия (часть 4)

Рисунок 2.5 иллюстрирует последовательность действий при аналитическом описании этапа разгрузки (этап 2), а также при

формировании массива данных и запись полученного массива данных в дополнении к уже сформированному массиву данных на предыдущем этапе алгоритма.

Разработанный алгоритм позволяет получать следующий массив данных: изменение скорости движения индентора $V(t)$, изменение перемещения индентора $h(t)$ и изменение контактного усилия $F(t)$ с использованием новых аналитических подходов обработки исходного сигнала ЭДС магнитоиндукционного преобразователя. Обработка полученного массива данных позволяет выделять такие параметры контактного ударного взаимодействия как: максимальное контактное усилие F_{max} , максимальная глубина внедрения индентора h_{max} , остаточная глубина внедрения индентора h_p , продолжительность активного этап удара τ_{act} , продолжительность пассивного этап удара τ_{pas} , скорость внедрения V_0 , соответствующая началу контакта индентора с испытываемым материалом, скорость внедрения V_2 , соответствующая завершению контакта индентора с испытываемым материалом, и, при необходимости, другие параметры.

2.2.2 Программное обеспечение обработки исходного сигнала магнитоиндукционного преобразователя

Для практической реализации разработанного алгоритма, приведенного в п. 2.2.1, было разработано программное обеспечение (ПО) с наименованием «ПО ДИ1», выполненное в программной среде MATLAB. Использование программной среды MATLAB обусловлено его направленностью на решение задач прикладной математики, однако в перспективе планируется реализация алгоритма на программном языке Python для решения промышленных задач.

При этом следует отметить, что для успешной практической реализации предложенного алгоритма необходимо предварительно выполнить преобразование, фильтрацию и оцифровку исходного сигнала ЭДС в следующей последовательности (рисунок 2.6):

- аналого-цифровое преобразование зависимости ЭДС на выходе датчика и запись в память ПК в виде дискретного двумерного массива;
- применение операции цифровой фильтрации к полученному массиву ЭДС для устранения высокочастотных шумов, наводимых в первичном преобразователе датчика;
- выделение и последующее удаление из массива областей, не несущих информации о процессе контактного ударного взаимодействия.

Для описанных целей в рамках настоящих диссертационных исследований использовался цифровой осциллограф.

Результатом обработки исходного сигнала ЭДС с датчика ДИ с использованием разработанного «ПО ДИ1» является массив данных $V(t)$, $h(t)$, $F(t)$, $F(h)$, а также их представление в виде графиков (рисунки 2.7 – 2.10 соответственно).

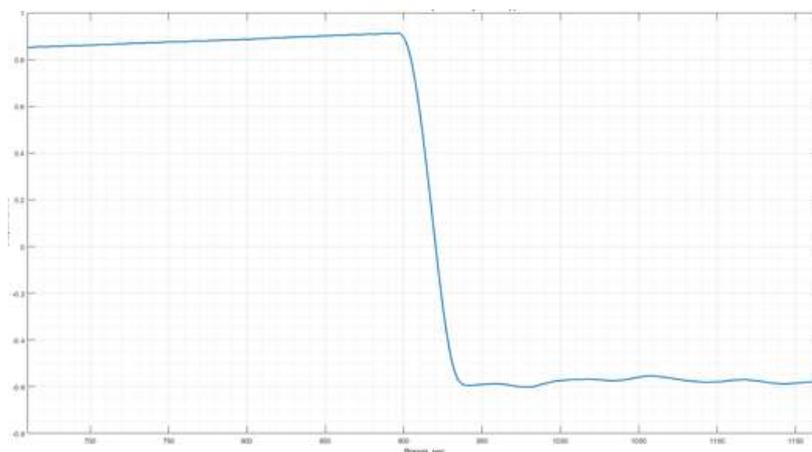


Рисунок 2.6 – Типовой исходный сигнал $\varepsilon(t)$ «ПО ДИ1»

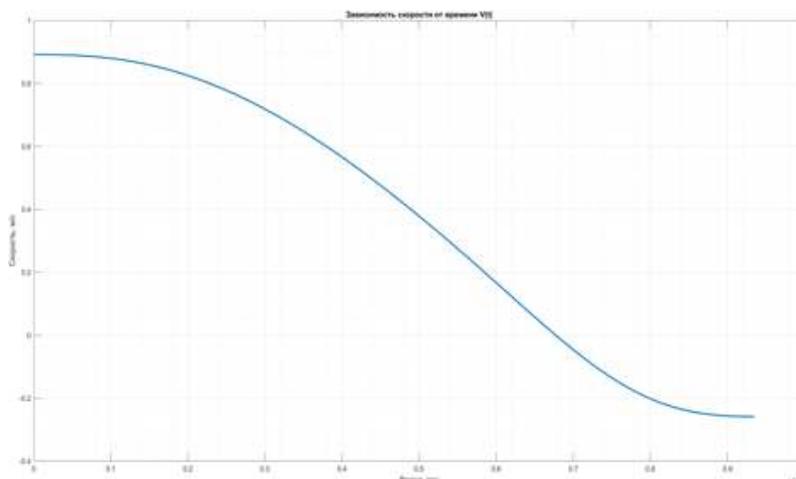
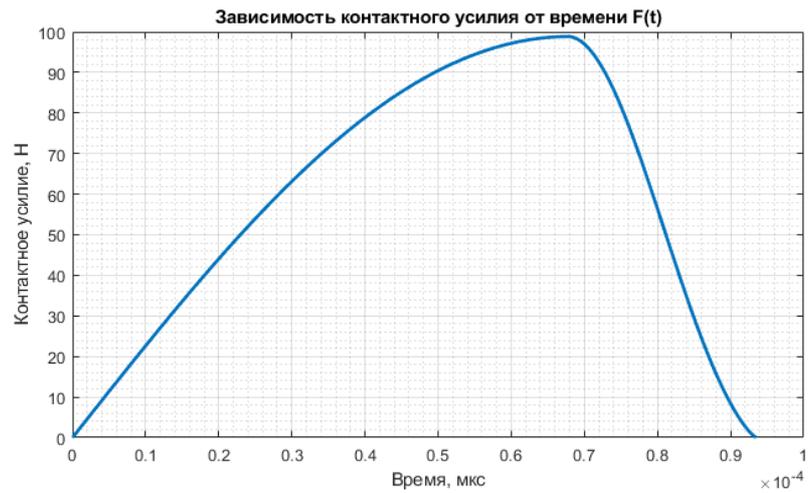
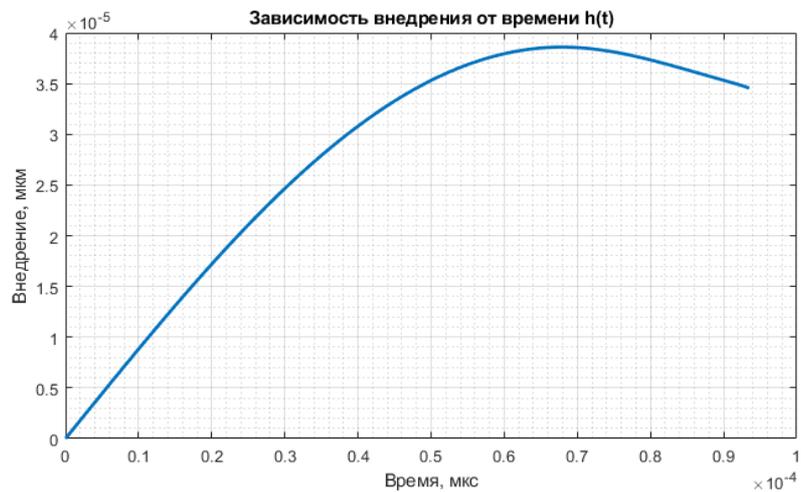
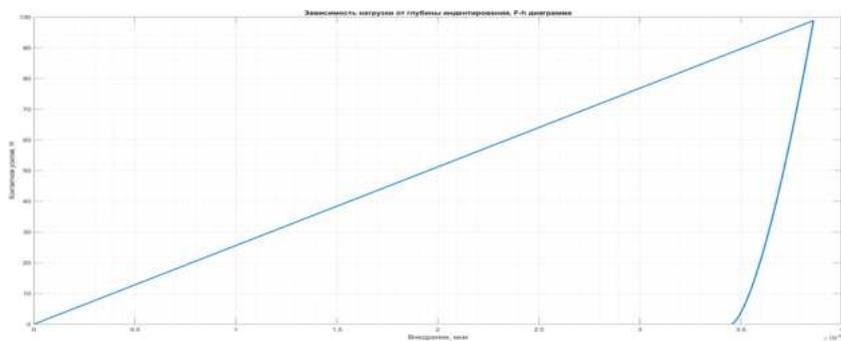


Рисунок 2.7 – Типовая зависимость $V(t)$ в «ПО ДИ1»

Рисунок 2.8 – Типовая зависимость $h(t)$ в «ПО ДИ1»Рисунок 2.9 – Типовая зависимость $F(t)$ в «ПО ДИ1»Рисунок 2.10 – Типовая зависимость $F(h)$ в «ПО ДИ1»

Типовой вид массива данных, получаемого при обработки исходного сигнала ЭДС с использованием «ПО ДИ1», приведен на рисунке 2.11.

h, мкм	V, м/с	F, Н	t, мкс
0.0000	1.7671	0.0000	0.0000
0.5902	1.7670	0.5373	0.5000
1.1804	1.7670	1.1054	1.0000
1.7705	1.7668	1.7057	1.5000
2.3606	1.7667	2.3395	2.0000
2.9507	1.7665	3.0074	2.5000
3.5406	1.7662	3.7100	3.0000
4.1305	1.7659	4.4472	3.5000
4.7203	1.7656	5.2189	4.0000
5.3099	1.7652	6.0249	4.5000
5.8994	1.7647	6.8650	5.0000
6.4887	1.7641	7.7388	5.5000
7.0778	1.7635	8.6460	6.0000
7.6667	1.7629	9.5863	6.5000
8.2554	1.7621	10.5594	7.0000
8.8438	1.7613	11.5650	7.5000
9.4320	1.7605	12.6026	8.0000
10.0198	1.7595	13.6720	8.5000
10.6073	1.7585	14.7726	9.0000
11.1944	1.7574	15.9041	9.5000
11.7812	1.7562	17.0661	10.0000
12.3675	1.7549	18.2580	10.5000
12.9534	1.7535	19.4793	11.0000
13.5389	1.7521	20.7296	11.5000
14.1238	1.7505	22.0082	12.0000
14.7082	1.7489	23.3147	12.5000

Рисунок 2.11 – Массив данных, получаемый с помощью «ПО ДИ1»

2.3 Нормирование параметров контактного ударного взаимодействия

В рамках настоящих диссертационных исследований при сравнении параметров контактного ударного взаимодействия различными методами или способами для лучшей наглядности предложено приводить параметры контактного ударного взаимодействия к безразмерному нормированному виду. Так значения $\varepsilon(t)$, $V(t)$, $h(t)$, $F(t)$ на всем промежутке взаимодействия можно представлять согласно выражениям (2.31-2.34):

$$\bar{\varepsilon}(t) = \frac{\varepsilon(t)}{\varepsilon_0} = \frac{\varepsilon(t)}{\varepsilon(t=t_0)}; \quad (2.31)$$

$$\bar{V}(t) = \frac{V(t)}{V_0} = \frac{V(t)}{V(t=t_0)}; \quad (2.32)$$

$$\bar{F}(t) = \frac{F(t)}{F_{max}} = \frac{F(t)}{F(t=t_1^*)}; \quad (2.33)$$

$$\bar{h}(t) = \frac{h(t)}{h_{max}} = \frac{h(t)}{h(t=t_1)}, \quad (2.34)$$

где t_0 – момент времени соответствующий началу контакта индентора с материалом испытуемого изделия;

t_1^* – момент времени соответствующий максимальному контактному усилию;

t_1 – момент времени соответствующий максимальной глубине внедрения индентора в материал испытуемого изделия;

t_2 – момент времени соответствующий завершению контакта индентора с материалом испытуемого изделия.

Тогда текущие значения нормированной ЭДС $\bar{\varepsilon}(t)$ будут равны текущим значениям нормированной скорости движения индентора $\bar{V}(t)$ во всем временном диапазоне от t_0 до t_2 контактного ударного взаимодействия индентора с испытуемым материалом (2.35):

$$\bar{\varepsilon}(t) = \bar{V}(t). \quad (2.35)$$

Совместное рассмотрение зависимостей $\bar{F}(t)$ и $\bar{h}(t)$ позволяет получить зависимость $\bar{F}(\bar{h})$, характер которой позволяет идентифицировать класс исследуемого материала (упругий, вязкий, пластический или совмещающий свойства), а также производить переход от значений $\varepsilon(t)$ к $\bar{V}(t)$ не используя коэффициент k , что, в свою очередь, снижает неопределенность получаемых результатов.

Стоит отметить, что идентификация класса исследуемого материала с помощью перехода к нормированному виду позволяет определять топографию восстановленного отпечатка индентирования, однако это является отдельной темой исследования.

2.4 Экспериментальная апробация алгоритма и программного обеспечения обработки исходного сигнала магнитоиндукционного преобразователя

Для подтверждения работоспособности разработанного программного обеспечения «ПО ДИ1» и подтверждения адекватности получаемых результатов была проведена экспериментальная апробация, которая состояла из двух частей: компьютерное моделирование и натурный эксперимент.

2.4.1 Компьютерное моделирование

Целью данного этапа исследований являлось виртуальное моделирование процесса динамического индентирования.

Компьютерное моделирование проводилось с использованием универсальной программной системы конечно-элементного анализа ANSYS.

Объектами исследования компьютерного моделирования выступили материалы с механическими характеристиками, приведенными в таблице 2.1. Выбор таких материалов с приведенными механическими характеристиками обусловлен близостью этих характеристик с характеристиками материалов натурального эксперимента.

Таблица 2.1 – Исходные данные механических характеристик материалов

Характеристики	АМг 6 (НВ 65)	ВАЛ 8 (НВ 90-100)	Сталь 60 (НВ 375)
Плотность материала, кг/м ³	2640	2730	7800
Модуль упругости, Па	$7,10 \cdot 10^{10}$	$7,20 \cdot 10^{10}$	$2,04 \cdot 10^{11}$
Коэффициент Пуассона, Па	0,31	0,30	0,32
Объемный модуль упругости, Па	$6,39 \cdot 10^{10}$	$6,00 \cdot 10^{10}$	$1,89 \cdot 10^{11}$
Модуль сдвига, Па	$2,77 \cdot 10^{10}$	$2,77 \cdot 10^{10}$	$7,73 \cdot 10^{10}$
Предел текучести, Па	$1,80 \cdot 10^8$	$3,40 \cdot 10^8$	$1,12 \cdot 10^9$
Касательный модуль, Па	$4,00 \cdot 10^8$	$1,00 \cdot 10^8$	400

В рамках данного этапа исследований были получены следующие результаты:

- смоделирован процесс динамического индентирования для каждого из заданных материалов;
- проведен поэлементный анализ процесса внедрения индентора в материал;
- с использованием модели получены массивы данных $V(t)$, $h(t)$ $F(t)$.

Интерфейс ANSYS при моделировании процесса внедрения индентора в материал приведен на рисунке 2.12.

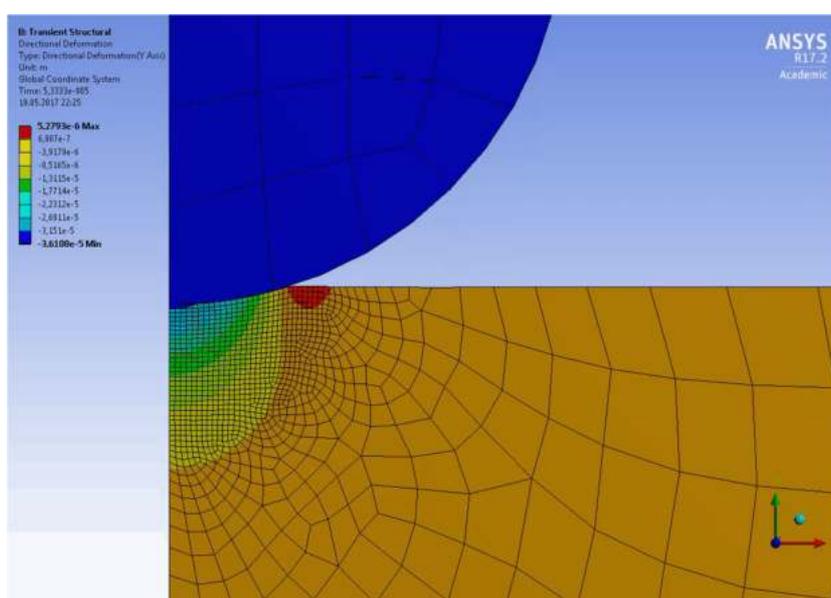


Рисунок 2.12 – Визуализация процесса внедрения индентора в материал в программной среде ANSYS

На рисунке 2.13 приведены полученные графики зависимостей $F(h)$ для материалов АМг 6, ВАЛ 8, Сталь 60.

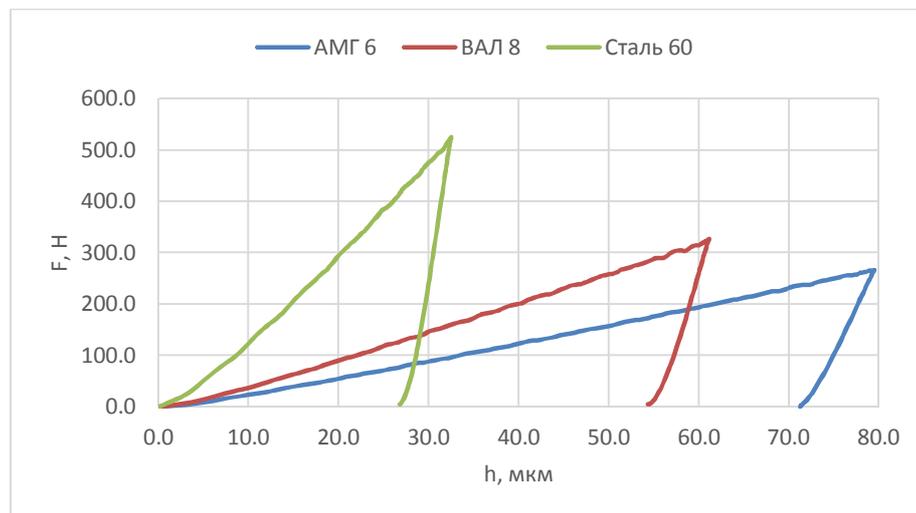


Рисунок 2.13 – Графики зависимостей $F(h)$
для материалов АМГ 6, ВАЛ 8, Сталь 60

Полученные значения параметров контактного ударного взаимодействия были приведены к нормированному виду в соответствии с положениями, изложенными п. 2.3. Графики зависимостей $\bar{F}(\bar{h})$ приведены на рисунке 2.14.

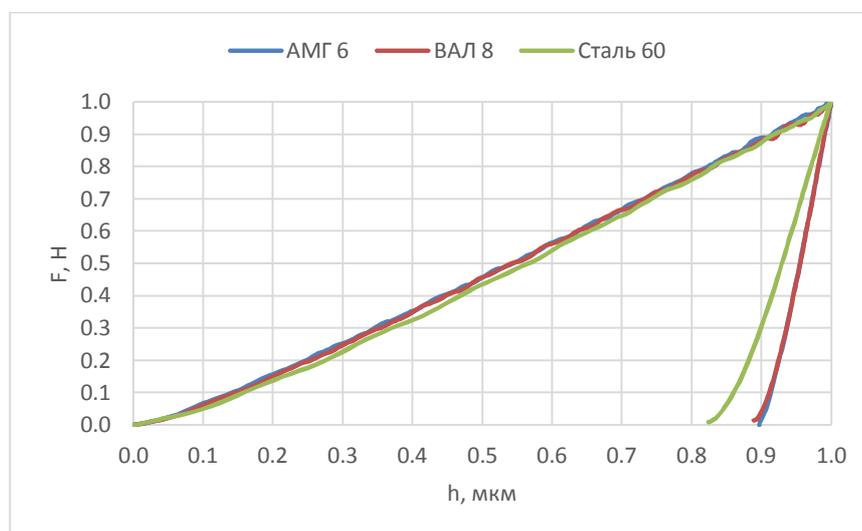


Рисунок 2.14 – Графики зависимостей $\bar{F}(\bar{h})$
для материалов АМГ 6, ВАЛ 8, Сталь 60

2.4.2 Натурный эксперимент

Целью данного этапа исследований являлось проведение натурального эксперимента и получение сигнала ЭДС для его дальнейшей обработки с

получением массива данных $V(t)$, $h(t)$ и $F(t)$. При этом при проведении натурального эксперимента подразумевалось получение массива данных, как с использованием разработанного в рамках настоящих диссертационных исследований «ПО ДИ1», так и с использованием ПО существующего прибора динамического индентирования «ИСПГ-1».

Для реализации натурального эксперимента использовалась экспериментальная установка контактного ударного взаимодействия (КУВ) (рисунок 2.15).

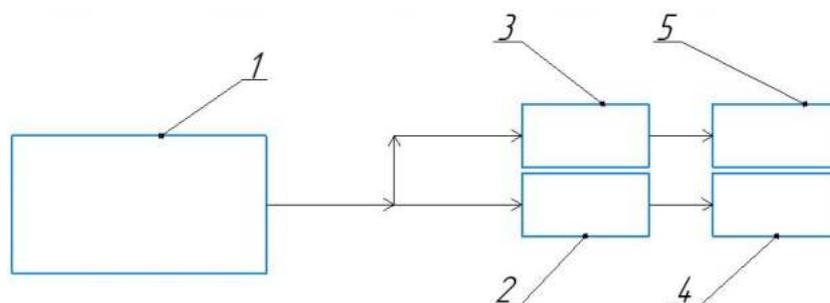


Рисунок 2.15 – Схема экспериментальной установки КУВ

В составе экспериментальной установки КУВ:

1 – датчик ДИ с гравитационным разгоном индентора для получения сигнала ЭДС (параметры датчика: $R = 0,75 \cdot 10^{-3}$ м, $m = 4,8 \cdot 10^{-3}$ кг);

2 – прибор ДИ «ИСПГ-1»;

3 – цифровой осциллограф для первичной оцифровки и сглаживания сигнала;

4 – ПК с установленным ПО «ИСПГ-1» для оценки параметров контактного ударного взаимодействия с использованием существующей экспериментальной модели;

5 – ПК с установленным ПО «ПО ДИ1» для оценки параметров контактного ударного взаимодействия, с использованием разработанной в рамках настоящей диссертационных исследований расчетно-экспериментальной модели.

Объектами испытаний натурального эксперимента выступили меры твердости по Бринеллю (МТ), состав, внешний вид и характеристики которых приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Объекты испытаний натурального эксперимента

Наименование	Внешний вид	Примечание
МТ 66НВ		Изготовлена из алюминиевого сплава Значение твердости в единицах твердости НВ: 55÷75 Показатель деформационного упрочнения материала согласно ГОСТ 25.503-97: 0,19÷0,26
МТ 101НВ		Изготовлена из углеродистой стали Значение твердости в единицах твердости НВ: 100±25 Показатель деформационного упрочнения материала согласно ГОСТ 25.503-97: 0,18÷0,25
МТ 383НВ		Изготовлена из углеродистой стали, Значение твердости в единицах твердости НВ по ТУ 25.0612.003-82: 400±50 Показатель деформационного упрочнения материала согласно ГОСТ 25.503-97: 0,18÷0,25

Натурный эксперимент проводился в следующей последовательности:

1. Подготовка объекта испытаний:

- 1.1 Очистка поверхности объекта испытаний;
- 1.2 Притирание объекта испытаний к массивной металлической конструкции;

1.3 Нанесение разметки на исследуемую поверхность объекта испытаний в соответствии с заранее подготовленной схемой измерения;

2. Установка датчика на исследуемую поверхность в исходную область согласно схеме измерения;

3. Проведение измерения, запись массива данных в ПК (рисунок 2.11 (4) и (5));

4. Установка датчика в следующую область измерения, повторение п.3;

5. Повторение п. 4 до получения 10 различных массивов данных;

В рамках данного этапа исследований получены следующие результаты.

Массивы данных $V(t)$, $h(t)$ и $F(t)$ для каждой МТ с использованием экспериментальной модели и расчетно-экспериментальной модели. Графики полученных зависимостей для МТ 101НВ приведены на рисунках 2.16 – 2.18 соответственно.

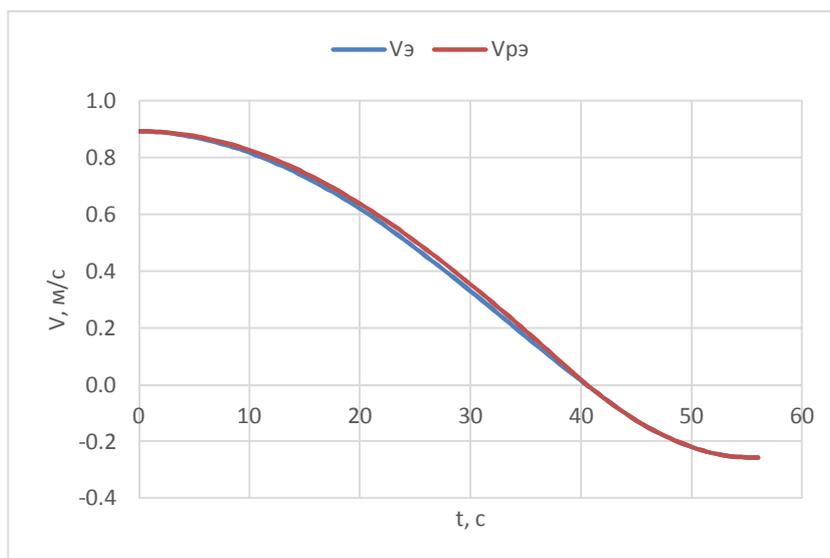


Рисунок 2.16 - Зависимость $V(t)$ для МТ 101:
 $Vэ$ – экспериментальной модели;
 $Vрэ$ – расчетно-экспериментальной модели

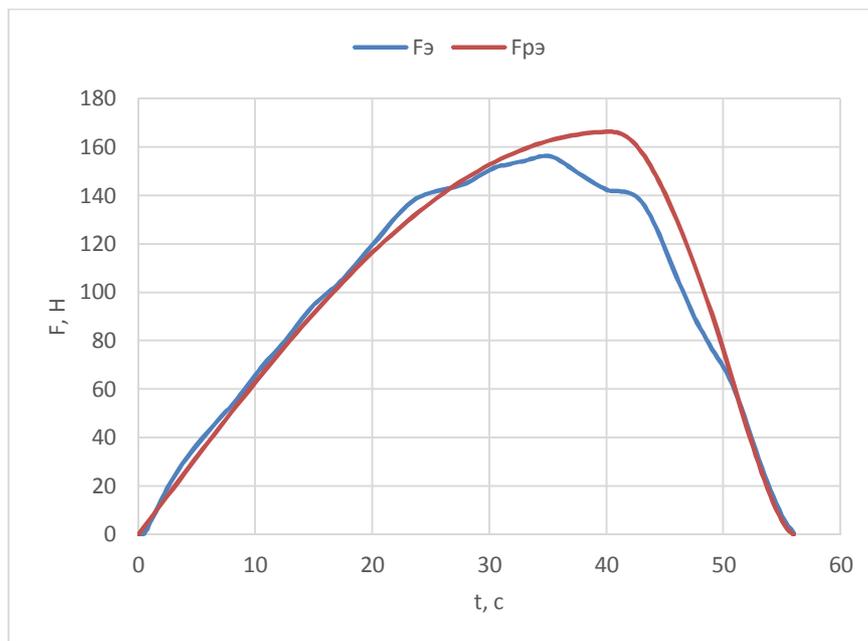


Рисунок 2.17 - Зависимость $F(t)$ для МТ 101:
 $Fэ$ – экспериментальной модели;
 $Fрэ$ – расчетно-экспериментальной модели

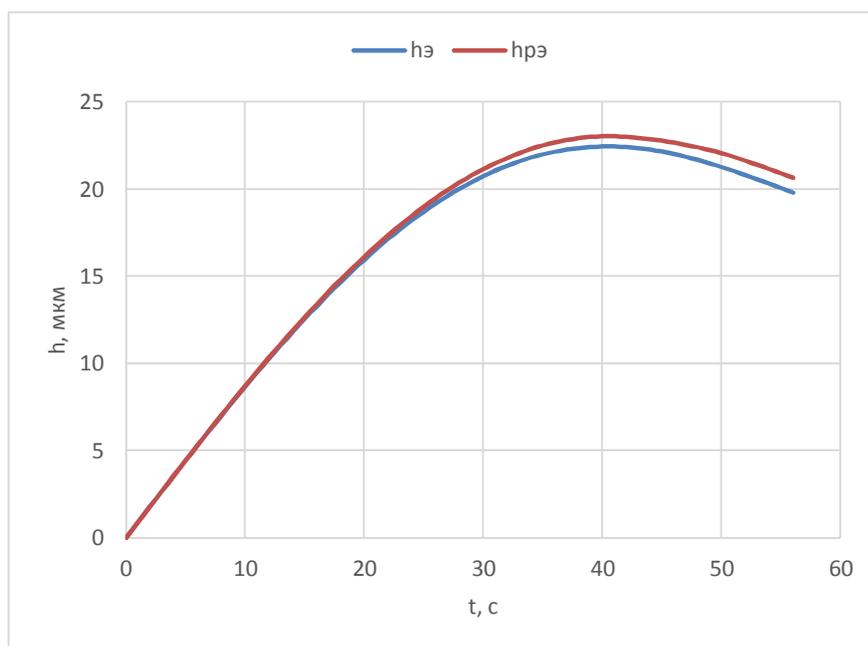


Рисунок 2.18 - Зависимость $h(t)$ для МТ 101:
 $hэ$ – экспериментальной модели;
 $hрэ$ – расчетно-экспериментальной модели

Зависимости $F(h)$ для всех мер твердости приведены на рисунках 2.19 – 2.21.

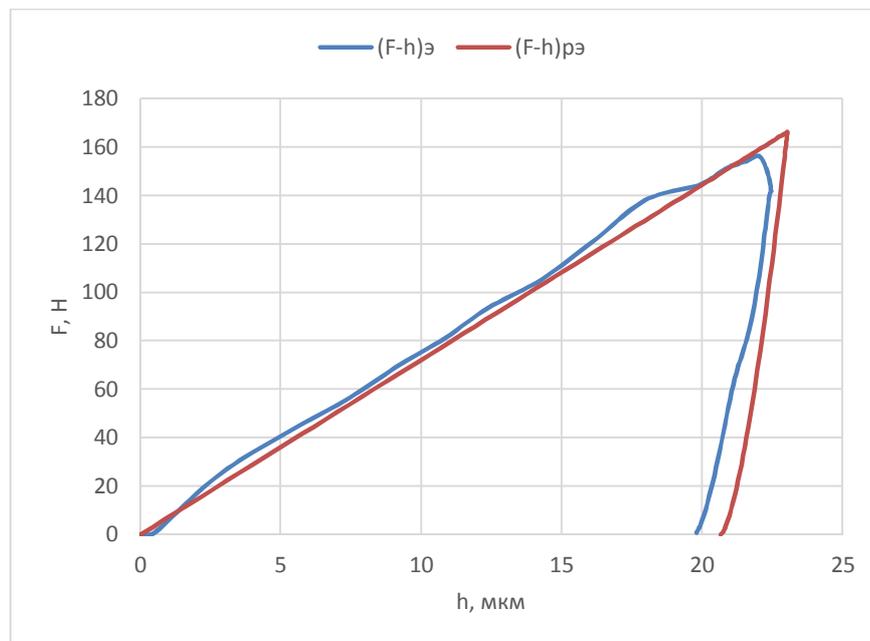


Рисунок 2.19 - Зависимость $F(h)$ для МТ 101НВ:
 $F-h_э$ – экспериментальной модели;
 $F-h_{рэ}$ – расчетно-экспериментальной модели

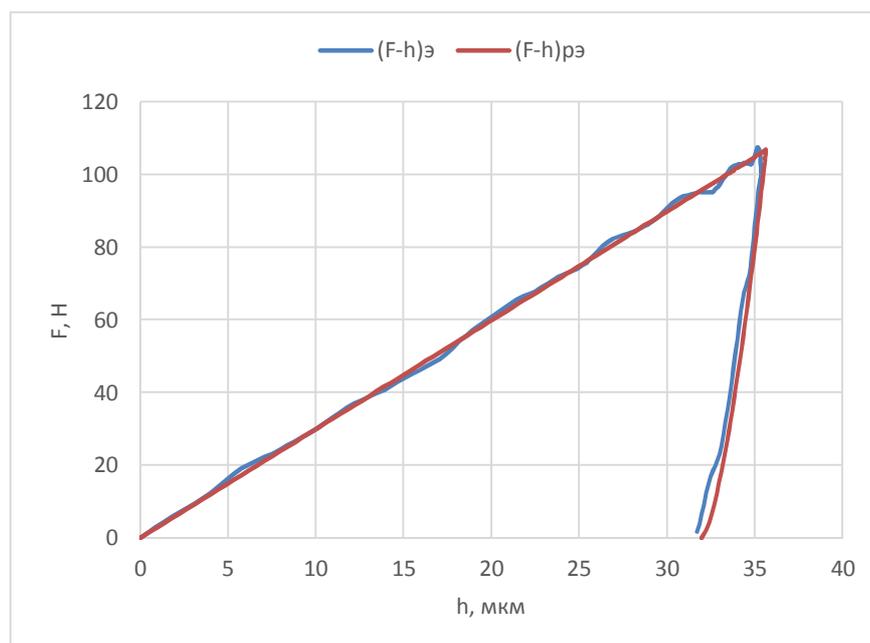


Рисунок 2.20 - Зависимость $F(h)$ для МТ 66НВ:
 $F-h_э$ – экспериментальной модели;
 $F-h_{рэ}$ – расчетно-экспериментальной модели

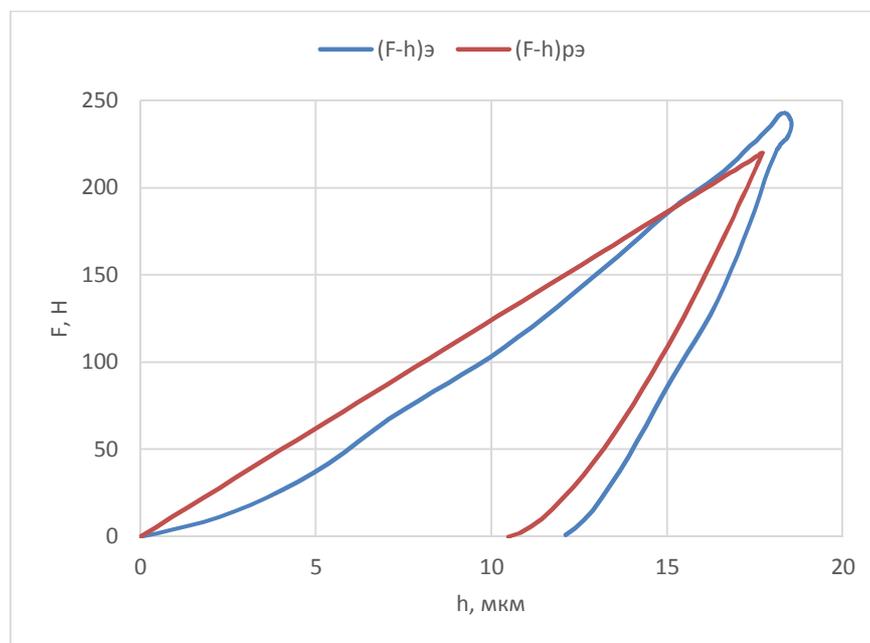


Рисунок 2.21 - Зависимость $F(h)$ для МТ 383НВ:
 $F-h$ э – экспериментальной модели;
 $F-h$ рэ – расчетно-экспериментальной модели

Сравнительный анализ результатов расчетно-экспериментальной модели и экспериментальной модели проводился путем определения автокорреляции остатков с использованием критерия Дарбина-Уотсона и построения графиков остатков.

Расчет критерия Дарбина-Уотсона производился с использованием следующей формулы (2.36):

$$DW = \frac{\sum_{i=2}^n (\varepsilon_i - \varepsilon_{i-1})^2}{\sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2}, \quad (2.36)$$

где ε_i - последовательное значение остатка.

В таблице 2.3 приведены результаты расчета автокорреляции остатков для МТ 66НВ, 101НВ, 383НВ.

Таблица 2.3 – Результаты автокорреляции остатков

МТ	DW_v , %	DW_h , %	DW_F , %
МТ 66НВ	0,20	0,30	1,45
МТ 101НВ	0,20	0,10	1,10
МТ 383НВ	0,40	0,10	0,80

Значения параметров контактного ударного взаимодействия, полученные с использованием расчетно-экспериментальной модели, были приведены к нормированному виду. Графики зависимостей $\bar{F}(\bar{h})$ для всех МТ приведены на рисунке 2.22.

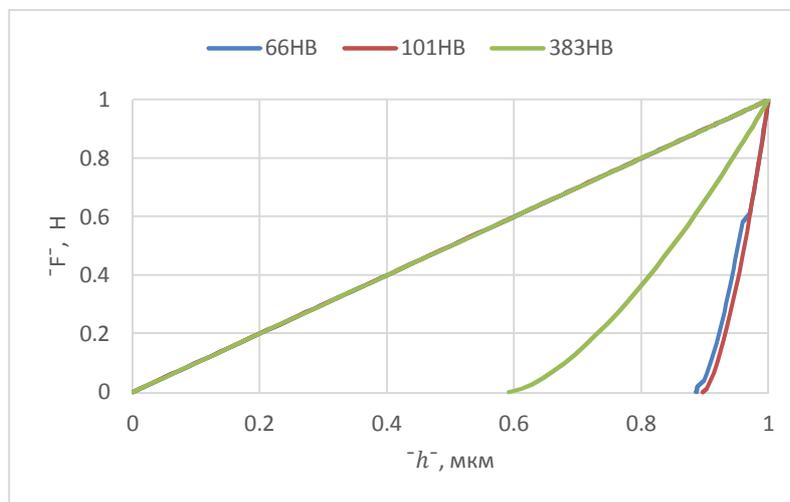


Рисунок 2.22 – Графики зависимостей $\bar{F}(\bar{h})$ для МТ 66НВ, 101НВ, 383НВ

2.4.3 Сравнительный анализ расчетно-экспериментальной модели и компьютерного моделирования

В рамках сравнительного анализа были рассмотрены следующие результаты:

- исходные характеристики материалов мер твердости по Бринеллю;
- результаты компьютерного моделирования;
- результаты натурального эксперимента в части расчетно-экспериментальной модели.

Сравнительный анализ результатов компьютерного моделирования и натурального эксперимента проводился путем определения автокорреляции остатков с использованием критерия Дарбина-Уотсона и построения графиков остатков. В таблице 2.4 приведены результаты расчета автокорреляции остатков для МТ 66НВ, 101НВ, 383НВ.

Таблица 2.4 – Результаты автокорреляции остатков

МТ	$DW_h, \%$	$DW_F, \%$
МТ 66НВ	1,42	1,86
МТ 101НВ	1,54	1,64
МТ 383НВ	1,49	0,74

На рисунке 2.23 приведена графическая иллюстрация полученных результатов сравнения МТ 66НВ с материалом АМГ 6, соответствующего характеристикам МТ 66НВ.

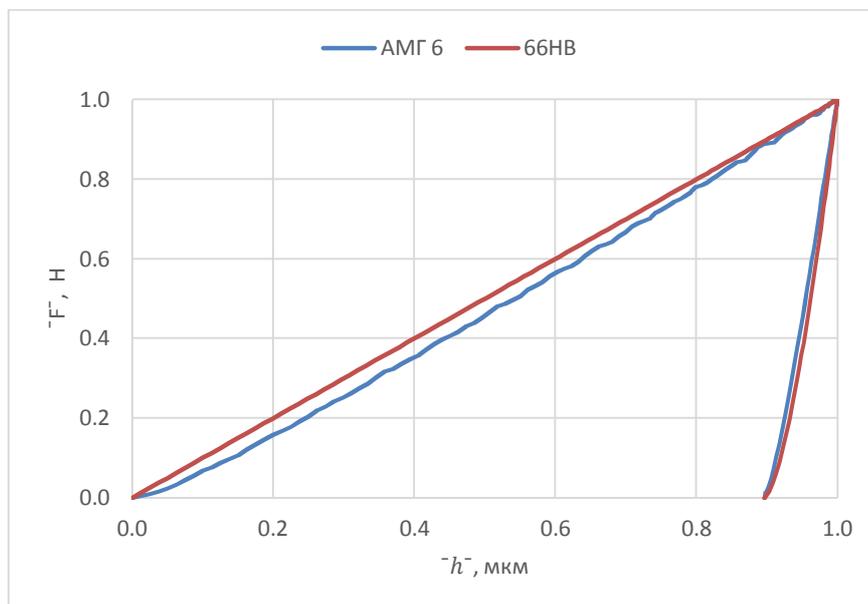


Рисунок 2.23 - Графики зависимостей $\bar{F}(\bar{h})$ для АМГ 6 и МТ 66НВ

На рисунках 2.24-2.25 приведена графическая иллюстрация полученных результатов сравнения МТ 101НВ с материалом ВАЛ 8 и МТ 383НВ с материалом Сталь 60 соответственно.

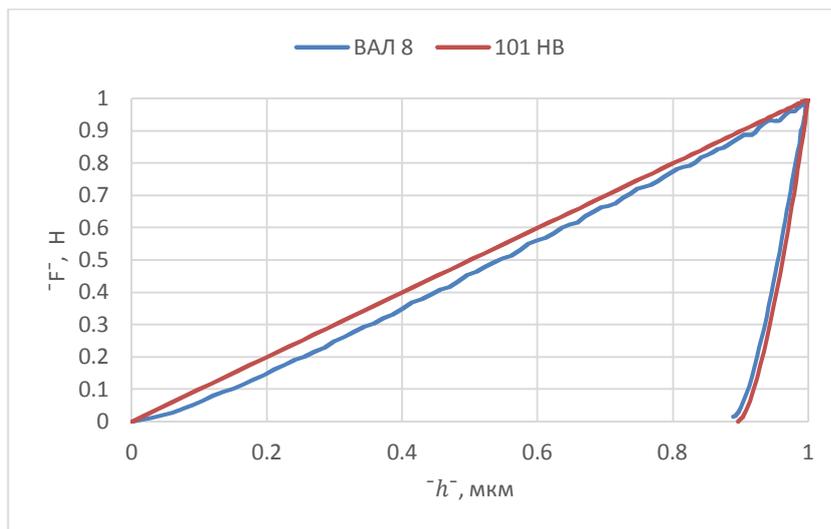


Рисунок 2.24 - Графики зависимостей $\bar{F}(\bar{h})$ для ВАЛ и МТ 101НВ

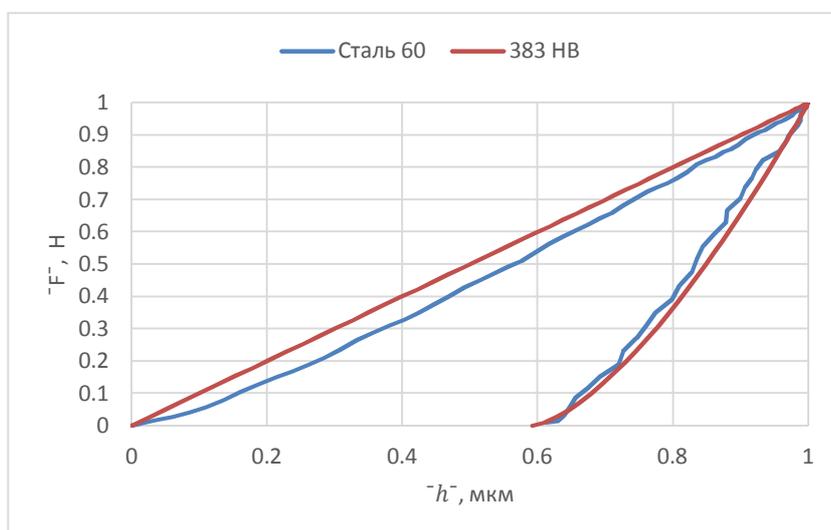


Рисунок 2.25 - Графики зависимостей $\bar{F}(\bar{h})$ для Сталь 60 и МТ 383НВ

2.4.4 Расчет погрешности оценки глубины остаточного отпечатка индентирования

Для оценки расчета погрешности оценки глубины остаточного отпечатка индентирования был проведен эксперимент, который заключался в следующем:

1. Индентирование образцов различных материалов (не менее 5 измерений в каждом образце);

2. Для каждого из измерений выделение значений h_p из полученного массива данных;

3. Проведение металлографических исследований остаточного отпечатка индентирования с целью измерения реального значения глубины остаточного отпечатка индентирования h_p^* для каждого проведенного индентирования (измерения);

4. Сравнение полученных значений.

На рисунке 2.26 для справки приведена часть полученного массива данных для одного из измерений на мере твердости 383НВ, где красным маркером отмечено искомое значение h_p .

14.5102	-0.3892	121.1770	37.5000
14.3119	-0.4042	113.2708	38.0000
14.1063	-0.4183	105.3068	38.5000
13.8939	-0.4313	97.3253	39.0000
13.6752	-0.4434	89.3255	39.5000
13.4507	-0.4546	81.3611	40.0000
13.2209	-0.4648	73.4475	40.5000
12.9861	-0.4741	65.6607	41.0000
12.7470	-0.4825	58.0241	41.5000
12.5039	-0.4900	50.5822	42.0000
12.2572	-0.4966	43.3805	42.5000
12.0075	-0.5024	36.4280	43.0000
11.7550	-0.5075	29.8122	43.5000
11.5002	-0.5117	23.5621	44.0000
11.2434	-0.5154	17.6316	44.5000
10.9850	-0.5184	12.0916	45.0000
10.7252	-0.5207	7.0909	45.5000
10.4644	-0.5225	2.5910	46.0000

Рисунок 2.26 – Массив данных индентирования МТ 383НВ

На рисунке 2.27 приведен внешний вид полученного остаточного отпечатка индентирования МТ 383НВ. Отметим, что поверхность меры твердости имеет достаточную для данных исследований шероховатость и в дополнительной подготовке не нуждается.



Рисунок 2.27 – Внешний вид остаточного отпечатка индентирования МТ 383НВ

Металлографические снимки остаточных отпечатков индентирования получены с использованием металлографического микроскопа Zeiss AxioScore A1 с программным обеспечением Thixomet PRO, внешний вид которого приведен на рисунке 2.28.



Рисунок 2.28 – Внешний вид Zeiss AxioScore A1

На рисунках 2.29-2.30 приведены металлографические снимки с фокусом оптического модуля микроскопа на поверхность меры твердости и на дно остаточного отпечатка соответственно.

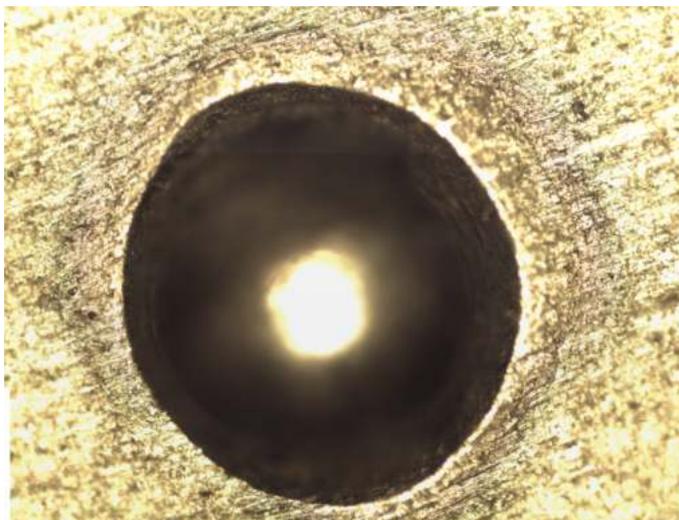


Рисунок 2.29 – Металлографический снимок остаточного отпечатка.
Фокус на поверхность МТ

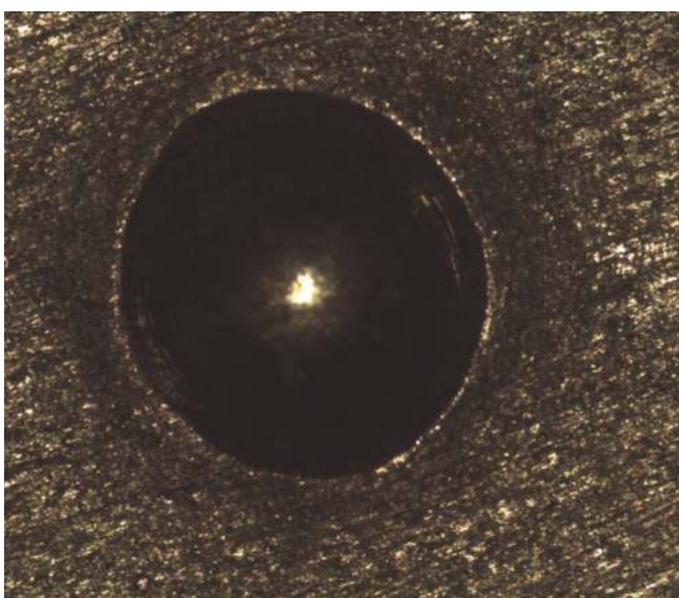


Рисунок 2.30 – Металлографический снимок остаточного отпечатка.
Фокус на дно отпечатка МТ

С использованием программных функций Thixomet PRO была рассчитана разница положения оптического модуля при фокусе на поверхность меры и фокуса на дно остаточного отпечатка. Полученное значение соответствует реальному значению глубины остаточного отпечатка h_p^* .

В таблице 2.5 приведены полученные значения для всех 5 измерений МТ 383НВ. Систематическая, случайная и основная погрешность для полученных результатов рассчитана на основе зависимостей, представленных в ГОСТ Р 56474-2015 [10].

Систематическую составляющую погрешности $\widetilde{\Delta}_c$ вычисляют по формуле (2.37):

$$\widetilde{\Delta}_c = \frac{1}{5} \sum_{j=1}^5 \Delta_j, \quad (2.37)$$

где Δ_j – разность значений h_p^* и h_p испытуемого образца при j-м измерении.

Случайную составляющую погрешности $\dot{\Delta}$ вычисляют по (2.38):

$$\dot{\Delta} = y \cdot \sigma, \quad (2.38)$$

где y – коэффициент Стьюдента (при доверительной вероятности 0,95 и числе наблюдений $n=5$ коэффициент Стьюдента равен $y=2,78$);

σ – среднеквадратическое отклонение случайной составляющей погрешности оценки значения h_p , вычисляемого по (2.39):

$$\sigma = \frac{1}{2} \sqrt{\sum_{j=1}^5 (\Delta_j - \widetilde{\Delta}_c)^2}. \quad (2.39)$$

Основную погрешность Δ вычисляют по формуле (2.40):

$$\Delta = \widetilde{\Delta}_c + \dot{\Delta}, \quad (2.40)$$

Результаты расчёта погрешностей для всех исследованных материалов образцов приведена в таблице 2.6.

Таблица 2.5 – Расчет погрешности оценки h_p МТ 383НВ

№ изм.	h_p , мкм	h_p^* , мкм
1	10,46	11,05
2	10,52	11,03
3	11,17	11,34
4	11,06	11,37
5	10,90	11,39
\bar{q}	10,82	11,24
$s(\bar{q})$	0,32	0,18
$\widetilde{\Delta}_c$		0,41
$\dot{\Delta}$		0,47
Δ		0,88

Таблица 2.6 – Расчет погрешностей оценки h_p исследуемых материалов

Образец / материал	h_p , мкм	h_p^* , мкм	Δ
МТ 66НВ / АМг 6	32,30	33,05	0,68
МТ 101НВ / Вал 8	20,31	20,94	0,74
МТ 383НВ / Сталь 60	10,82	11,24	0,88

Полученные результаты (таблицы 2.5-2.6) показывают, что погрешность, связанная с оценкой остаточного отпечатка индентирования, существенно не влияет на итоговый результат оценки объемной динамической твердости.

По итогам анализа полученных результатов было отмечено следующее:

1. Результаты, полученные с использованием разработанной расчетно-экспериментальной модели, результаты экспериментальной модели результаты, полученные с помощью компьютерного моделирования и исходные характеристики материалов, используемых в рамках данных исследований, коррелируют между собой.

2. Расхождения значений параметров контактного ударного взаимодействия расчетно-экспериментальной модели и значений параметров контактного ударного взаимодействия экспериментальной модели не превышают 1,5% по критерию Дарбина-Уотсона.

3. Расхождения расчетно-экспериментальных значений параметров натурального эксперимента и значений параметров компьютерного моделирования не превышает 2% по критерию Дарбина-Уотсона.

4. Основная погрешность оценки глубины остаточного отпечатка индентирования не превышает 1.

5. Разработанное «ПО ДИ1» позволяет проводить достоверную оценку параметров контактного ударного взаимодействия, которая в дальнейшем позволит осуществлять оценку динамической твердости материалов.

В дальнейшем с целью оценки движения индентора был предложен стереоскопический метод технического зрения для регистрации кинематических характеристик процесса динамического индентирования при определении механических свойств материалов. Предложенный метод

позволяет с высокой точностью определять значения скорости движения индентора [28].

2.5 Выводы по главе 2

1. В рамках развития метода динамического индентирования предложена расчетно-экспериментальная модель и алгоритм оценки параметров контактного ударного взаимодействия с упругопластическим полупространством, которые в отличие от существующих моделей и алгоритмов рассчитываются согласно аналитическим зависимостям.

2. Для экспериментальной реализации алгоритма оценки параметров контактного ударного взаимодействия с упругопластическим полупространством разработано программное обеспечение.

3. Для подтверждения работоспособности разработанного алгоритма приведены экспериментальные исследования с использованием программного обеспечения «ПО ДИ1». Выявлены корреляционные зависимости результатов, полученных с использованием программного обеспечения, с результатами моделирования процесса динамического индентирования в программной среде ANSYS, результатами полученными с использованием существующего ПО «ИСПГ-1» и с результатами стандартизованных статических испытаний по методу Бринелля. По итогам анализа полученных результатов была отмечена возможность использования разработанного алгоритма и программного обеспечения для достоверной оценки параметров контактного ударного взаимодействия.

ГЛАВА 3 РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОЦЕНКИ ОБЪЕМНОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ ТВЕРДОСТИ ПО ПАРАМЕТРАМ КОНТАКТНОГО УДАРНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

3.1 Подходы к оценке объемной динамической твердости

3.1.1 Оценка динамической твердости $HD_{IT}^{(S)}$ по ГОСТ Р 56474-2015 [10], основанная на расчете отношения значения контактной силы F_{hmax} , соответствующей максимальной глубине внедрения индентора h_{max} , к площади поверхности восстановленного отпечатка $A_p = 2\pi R h_p$ (где R - радиус индентора, h_p - остаточная глубина внедрения индентора), в полной не учитывает весь объем информации, получаемый по результатам индентирования. Об этом свидетельствуют авторы работ [36, 38, 39, 40, 69], предлагающие использовать для оценки твердости при инструментальном индентировании энергетический подход. Следует отметить, что в работах [39-40] данный подход к оценке твердости, основан на отношении работы деформирования к объему вытесненного материала от уровня исходной поверхности, а не объема восстановленного отпечатка (остаточной глубины внедрения) [37].

Сам термин динамической твердости был введен Мартелем в 1895 году [66]. В своих экспериментах Мартель использовал стальной шар, который падал с высоты h_1 на гладкую металлическую поверхность и формировал сферическую лунку на этой поверхности. Этот процесс был описан следующей зависимостью (3.1):

$$A/V = const, \quad (3.1)$$

где A - кинетическая энергия шара,

V - объем лунки.

Поскольку это отношение имеет ту же размерность, что и давление [Па], его можно рассматривать как динамическую твердость металлов [62, 74].

Таким образом, твердость по Мартелю HMR определяется как отношение (3.2):

$$HMR = \frac{A}{V}, \quad (3.2)$$

где A – работа, затраченная на формирование лунки;

V – объем лунки.

Поскольку HMR имеет ту же размерность, что и твердость по Майеру (среднее контактное давление при вдавливании) и характеризует тот же процесс, можно предположить следующее (3.3):

$$HMR = K \cdot HM, \quad (3.3)$$

где K – безразмерный параметр.

В своих работах Мартель рассчитывал твердость согласно (3.4):

$$HMR = \frac{mgh_1}{V}. \quad (3.4)$$

В эксперименте, выполненным Мартелем, после упругого удара шаром произошло восстановление геометрии (формы) лунки, и шар отскочил на некоторую высоту h_2 ($h_2 < h_1$). Поскольку в эксперименте было невозможно измерить объем вдавливания под нагрузкой (для расчета невосстановленной твердости), была рассчитана восстановленная твердость. При этом выдвинута гипотеза, что энергия, вызвавшая пластическую (остаточную) деформацию, может быть рассчитана путем вычитания энергии упругого восстановления из кинетической энергии шара.

Математическое описание процесса динамического индентирования выведено Табором [74], который получил следующее уравнение, которое принимают во внимание энергию упругого восстановления (3.5):

$$HMR = \frac{mg(h_1) - 3/8 \cdot h_2}{V}. \quad (3.5)$$

В тоже время твердость по Мартелю можно рассчитать при статическом вдавливании с помощью пирамидального индентора с использованием инструментальной твердости с записью диаграммы «Нагрузка на индентор P - смещение индентора h ». В этом случае работа, затрачиваемая на формирование вдавливания равна площади под кривой

$P-h$ и объем лунки можно определить исходя из контактной глубины проникновения индентора h_c .

Методика определения h_c была разработана [72]. Значение h_c также можно определить по стандарту микроскопических методов путем определения размера диагонали вдавливания (с учетом допущения, что размер диагонали не изменяется при восстановлении) и расчета высоты внедрения пирамиды, используя значение центральной линии к угловому значению (профиль) пирамидального индентора.

Учитывая приведенные факторы, в настоящих диссертационных исследованиях твердость материала при динамическом индентировании предлагается определять на основе показателя – объемная динамическая твердость $HD_{IT}^{(V)}$, а расчет его численного значения производить по отношению работы W_p , затрачиваемой на упругопластическую деформацию испытуемого материала в результате испытательного удара, к объему восстановленного отпечатка V_p (3.6):

$$HD_{IT}^{(V)} = \frac{W_p}{V_p}. \quad (3.6)$$

Работа W_p , затрачиваемая на упругопластическую деформацию, может быть определена по выражению (3.7):

$$W_p = m(V_0^2 - V_2^2), \quad (3.7)$$

где m - масса ударника, кг;

V_0 - скорость ударника в момент времени соответствующий началу контактного взаимодействия индентора с испытываемым материалом [26], м/с;

V_2 - скорость ударника в момент времени соответствующий завершению контактного взаимодействия индентора с испытываемым материалом [26], м/с.

Принимая допущение, что форма восстановленного отпечатка представляет собой сферический сегмент, его объем можно определить по формуле (3.8):

$$V_p = \pi h_p^2 \left(R_p - \frac{1}{3} h_p \right), \quad (3.8)$$

где h_p – остаточная глубина отпечатка после индентирования (глубина восстановленного отпечатка), м;

R_p – радиус кривизны поверхности восстановленного отпечатка, м.

При этом при определении радиуса кривизны поверхности восстановленного отпечатка R_p необходимо учитывать контактную топографию поверхности материала при индентировании [26]. Внедрение индентора сферической формы может сопровождаться, как продавливанием материала ниже уровня исходной поверхности [26] (рисунок 3.1), так и выдавливанием вокруг него материала выше уровня исходной поверхности или образованием навала [26] (рисунок 3.2). Такие эффекты изменения поверхности материала при индентировании в иностранной литературе получили название «sink-in» («прогиб») и «pile-up» («навал») соответственно. Эффекты «прогиб» и «навал» характеризуются следующими неравенствами [26]:

- при $h_c < h_{max}$ – «прогиб» (рисунок 3.1);
- при $h_c > h_{max}$ – «навал» (рисунок 3.2).

где h_c – контактная глубина внедрения индентора, м;

h_{max} – максимальная глубина внедрения индентора, м [26].

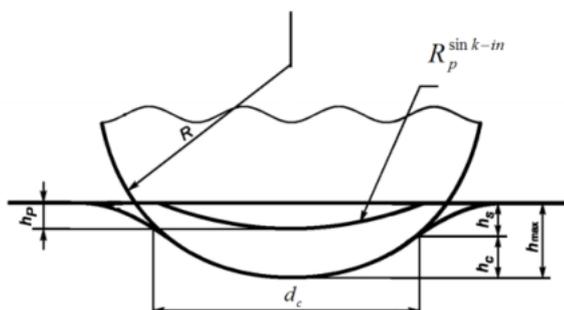


Рисунок 3.1 – Схема профиля поверхности при деформировании упругопластического полупространства жестким сферическим индентором с эффектом «sink-in» / «прогиб» [27]:

h_{max} – максимальная глубина внедрения индентора; h_p – остаточная глубина внедрения индентора; h_c – контактная глубина внедрения индентора; h_s – упругий прогиб контура отпечатка; R – радиус индентора; $R_p^{sink-in}$ – радиус кривизны поверхности восстановленного отпечатка

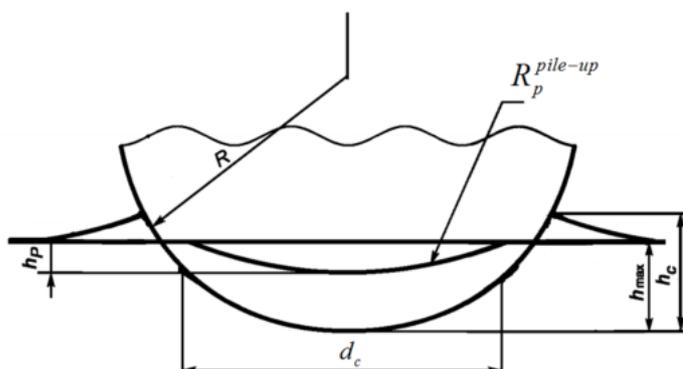


Рисунок 3.2 – Схема профиля поверхности при деформировании упругопластического полупространства жестким сферическим индентором с эффектом «pile-up» / «навал» [27]:

h_{max} – максимальная глубина внедрения индентора; h_p – остаточная глубина внедрения индентора; h_c – контактная глубина внедрения индентора; R – радиус индентора; $R_p^{pile-up}$ – радиус кривизны поверхности восстановленного отпечатка

Таким образом, по соотношению h_c к h_{max} можно судить о данных эффектах, а именно:

- если $C^2 = \frac{h_c}{h_{max}} < 1$, то «прогиб»,
- если $C^2 = \frac{h_c}{h_{max}} > 1$, то «навал».

Результаты анализа эффектов «sink-in» / «pile-up» («прогиб» / «навал») при теоретическом, в том числе методами конечно-элементного моделирования, и экспериментальном исследованиях твердости, проведенных разными авторами показывают, что значение характеристики C^2 зависит от значений показателя деформационного упрочнения материала n (экспоненты упрочнения) [55, 59, 64, 68, 77, 78], а также от отношения $\frac{\sigma_y}{E}$, относительной глубины внедрения $\frac{h}{R}$ и коэффициента трения μ [58, 62]. Выражения для расчета значений характеристики C^2 по значениям показателя деформационного упрочнения материала n согласно источникам [59, 55, 64, 68, 70, 77] представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Выражения для расчета значений характеристики C^2

Формула	Порядковый номер формулы
$C^2 = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{n}{2}\right)^{2\left(\frac{1-n}{n}\right)}$	(3.9)
$C^2 = \frac{5}{2} \left(\frac{2-n}{n+4}\right)$	(3.10)
$C^2 = \frac{1}{4} (5 - 3n^{0,7})$	(3.11)
$C^2 = 1,276 - 1,748 \cdot n + 2,451 \cdot n^2 - 1,469 \cdot n^3$	(3.12)
$C^2 = 1,4e^{-0,97n}$	(3.13)

Графики изменения значений характеристики C^2 от значений показателя деформационного упрочнения материала n , рассчитанных по формулам (3.9–3.13), представлены на рисунке 3.3.

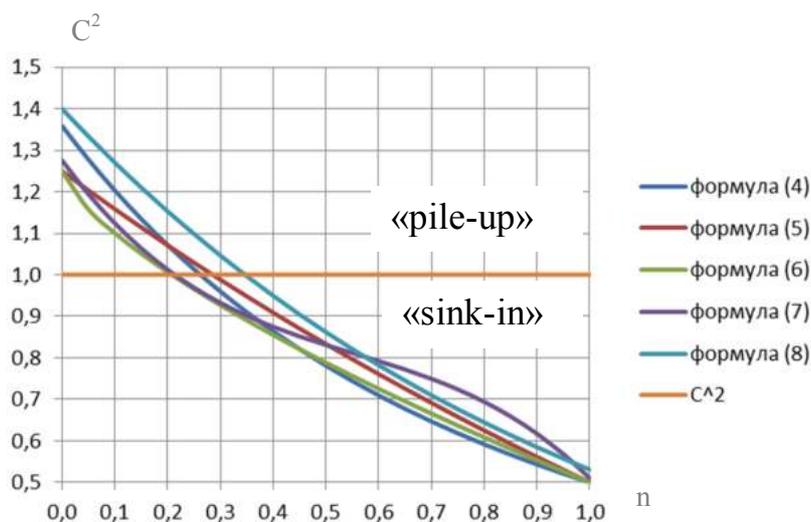


Рисунок 3.3 – Графики изменения характеристики C^2 от значений показателя деформационного упрочнения материала n

Из графиков (рисунок 3.3) видно, что:

– значение показателя деформационного упрочнения материала n , соответствующее $C^2 = 1$, варьируется в пределах от 0,18 до 0,35;

– при значениях показателя деформационного упрочнения материала n в диапазоне от 0,1 до 0,5 значения характеристики C^2 , рассчитанные по

формуле (3.10), дают относительное расхождение от значений характеристик C^2 , рассчитанных по формулам (3.9, 3.11–3.13), менее 10%.

Анализ выражений для расчета характеристики C^2 согласно источникам [57, 64, 76] показывает, что они не представлены в виде, удобном для использования в алгоритмическом и программном обеспечении автоматизации приборов контроля твердости, реализующих метод ДИ.

В дальнейшем, в настоящих диссертационных исследованиях:

– для учета геометрического соотношения контактной глубины внедрения индентора (эффект «прогиб») $h_c^{sink-in}$ с контактной глубиной внедрения индентора (эффект «навал») $h_c^{pile-up}$ используется характеристика C^2 (3.14):

$$h_c^{pile-up} = C^2 h_c^{sink-in}; \quad (3.14)$$

– для расчета значений характеристики C^2 используется формула (3.10), которая нашла широкое практическое применение в алгоритмическом и программном обеспечении оборудования для контроля механических свойств материалов методом инструментального индентирования [61].

Принимаются следующие допущения:

– при снятии нагрузки перемещение всех точек деформированной поверхности происходит вертикально;

– форма поверхности восстановленного отпечатка представляет собой сферический сегмент с постоянным радиусом кривизны $R_p^{sink-in}$ или $R_p^{pile-up}$. Используя геометрическое соотношение между диаметром проекции отпечатка d_c с контактной глубиной h_c и диаметром сферического индентора D (3.15):

$$d_c = 2\sqrt{Dh_c - h_c^2} \approx 2\sqrt{Dh_c}, \quad (3.15)$$

а также геометрическое соотношение между диаметром проекции отпечатка d_c с глубиной остаточного пластического отпечатка h_p и диаметром сферического остаточного пластического отпечатка D_1 (3.16):

$$d_c = 2\sqrt{D_1h_p - h_p^2} \approx 2\sqrt{D_1h_p}, \quad (3.16)$$

можно найти выражение, связывающее $R_p^{sink-in}$ и R (см. рисунок 3.1) (3.17):

$$R_p^{sink-in} = R \frac{h_c}{h_p}. \quad (3.17)$$

Аналогичным образом, используя геометрическое соотношение между диаметром проекции отпечатка d_c с контактной глубиной h_c и диаметром сферического индентора D (3.18):

$$d_c = 2\sqrt{Dh_c - h_c^2} \approx 2\sqrt{Dh_c}, \quad (3.18)$$

а также геометрическое соотношение между диаметром проекции отпечатка с контактной глубиной контура восстановленного отпечатка и диаметром сферического остаточного пластического отпечатка D_1 (3.19):

$$d_c = 2\sqrt{D_1h_{cp} - h_p^2} \approx 2\sqrt{D_1h_{cp}} \quad (3.19)$$

можно найти выражение, связывающее $R_p^{pile-up}$ и R (см. рисунок 3.1) (3.20):

$$R_p^{pile-up} = R \frac{h_{cp}}{h_p}. \quad (3.20).$$

Значение контактной глубины внедрения h_c , используемой в формуле (3.11), может быть определено по следующему выражению (3.21):

$$h_c = h_{max} - h_s, \quad (3.21)$$

где h_{max} – максимальная глубина внедрения индентора;

h_s – упругий прогиб (восстановление) контура отпечатка.

В соответствии с анализом Снеддона [73] величина упругого прогиба контура отпечатка определяется по выражению (3.22):

$$h_s = \varepsilon \frac{F}{S}, \quad (3.22)$$

где ε – постоянная величина, зависящая от геометрии (формы) индентора (для сферического индентора $\varepsilon = 0,75$);

F – контактное усилие

S – контактная жесткость, вычисляемая по (3.23)

$$S = \frac{dF}{dh}, \quad (3.23)$$

где h – глубина внедрения индентора, соответствующая контактному усилию F .

Так как начальная часть кривой разгрузки нелинейна, то величину контактного усилия F можно представить следующей степенной зависимостью [2, 32] (3.24):

$$F = c_2(h - h_p)^\beta, \quad (3.24)$$

где h_p – остаточная глубина внедрения индентора (глубина пластического или восстановленного отпечатка), мм;

c_2 – константа, характеризующая испытуемый материал;

β – показатель степени, зависящий от характера взаимодействия и геометрии (формы) индентора (для упругого взаимодействия и сферического индентора $\beta = 1,5$).

Принимая в формуле (3.18) $h = h_{max}$ и используя формулы (3.5–3.8, 3.17, 3.21–3.24) можно рассчитать:

– величину упругого прогиба контура отпечатка h_s (3.25):

$$h_s = \frac{1}{2}(h_{max} - h_p); \quad (3.25)$$

– контактную глубину внедрения индентора h_c (3.26):

$$h_c = \frac{1}{2}(h_{max} + h_p); \quad (3.26)$$

– радиус кривизны поверхности восстановленного отпечатка $R_p^{sink-in}$ (3.27):

$$R_p^{sink-in} = \frac{1}{2}R \left(\frac{h_{max}}{h_p} + 1 \right); \quad (3.27)$$

– объем восстановленного отпечатка $V_p^{sink-in}$ (3.28):

$$V_p^{sink-in} = \frac{1}{2}\pi R h_p^2 \left(\frac{h_{max}}{h_p} - \frac{2h_p}{3R} + 1 \right); \quad (3.28)$$

– объемную динамическую твердость $HD_{IT}^{(V)sink-in}$ (3.29):

$$HD_{IT}^{(V)sink-in} = \frac{m(V_0^2 - V_2^2)}{\pi R h_p^2 \left(\frac{h_{max}}{h_p} - \frac{2h_p}{3R} + 1 \right)}. \quad (3.29)$$

Значение контактной глубины контура восстановленного отпечатка h_{cp} , используемое в формуле (3.20), может быть определено по (3.30):

$$h_{cp} = h_p + C^2 h_c - h_{max} + h_s. \quad (3.30)$$

Используя формулы (3.5–3.8, 3.20, 3.25) можно рассчитать:

– радиус кривизны поверхности восстановленного отпечатка $R_p^{pile-up}$ (3.31):

$$R_p^{pile-up} = \frac{1}{2}R \left(\frac{h_{max}}{h_p} (C^2 - 1) + C^2 + 1 \right); \quad (3.31)$$

– объем восстановленного отпечатка $V_p^{pile-up}$ (3.32):

$$V_p^{pile-up} = \frac{1}{2} \pi R h_p^2 \left(\frac{h_{max}}{h_p} (C^2 - 1) + C^2 - \frac{2h_p}{3R} + 1 \right); \quad (3.32)$$

– объемную динамическую твердость $HD_{IT}^{(V)pile-up}$ (3.33):

$$HD_{IT}^{(V)pile-up} = \frac{m(V_0^2 - V_2^2)}{\pi R h_p^2 \left(\frac{h_{max}}{h_p} (C^2 - 1) + C^2 - \frac{2h_p}{3R} + 1 \right)} \quad (3.33)$$

Формулы (3.29) и (3.33) удобны для использования, поскольку значения параметров контактного ударного взаимодействия h_p , h_{max} , V_0 , V_2 , необходимые для оценки объемной динамической твердости $HD_{IT}^{(V)sink-in}$ или $HD_{IT}^{(V)pile-up}$, определяются по результатам динамического индентирования [26].

3.1.2 Расчет характеристики C^2 может быть произведен с использованием следующих представленных вариантов:

Вариант 1

Для определения показателя деформационного упрочнения материала n в данном варианте используется эмпирический закон Мейера [3], который устанавливает связь между контактным усилием F при внедрении индентора сферической формы и диаметром проекции отпечатка d (3.34):

$$F = K d^m, \quad (3.34)$$

где K , m – константы.

Используя геометрическое соотношение между диаметром проекции отпечатка d с контактной глубиной h и диаметром сферического индентора D (3.35):

$$d = 2\sqrt{Dh - h^2} \approx 2\sqrt{Dh}, \quad (3.35)$$

выражение (3.34) может быть приведено к виду (3.36):

$$F = K^* h^{\frac{m}{2}}, \quad (3.36)$$

где $K^* = 2^m D^{\frac{m}{2}} K$ – константа.

Прологарифмировав выражение (3.36) получим (3.37):

$$\ln F = \ln K^* + \frac{m}{2} \ln h. \quad (3.32)$$

По экспериментальным данным результатов индентирования определяется значение константы m .

Используя данные, приведенные в [21, 59], показатель деформационного упрочнения n определяется по следующему выражению (3.38):

$$n = \frac{0,961m - 1,922}{0,961m - 0,922}. \quad (3.38)$$

Вариант 2

Для определения показателя деформационного упрочнения материала n в данном варианте используется степенной закон Холломона (Hollomon's power law) (3.39) и (3.40):

$$\sigma = k \varepsilon^n, \quad (3.39)$$

где $\sigma = \frac{F}{3\pi(Dh-h^2)}$ – напряжение, Н/м²; (3.40)

k – коэффициент упрочнения, Н/м²;

$\varepsilon = 0,4 * \left(\frac{Dh-h^2}{D}\right)^{\frac{1}{2}}$ – деформация.

Прологарифмировав выражение (3.39) получим (3.41):

$$\ln \sigma = \ln k + n \ln \varepsilon. \quad (3.41)$$

По экспериментальным данным результатов индентирования определяется значение показателя деформационного упрочнения n .

Вариант 3

Данный вариант основан на справочных данных значений показателя деформационного упрочнения n для различных материалов и сплавов, представленных в [21]. Однако следует отметить, что значение показателя

деформационного упрочнения n зависит как от деформации ε , так и от скорости деформации $\dot{\varepsilon}$:

$$n = f(\varepsilon; \dot{\varepsilon}).$$

Значения деформаций при статическом ε^{st} и динамическом ε^d внедрениях близки, поскольку согласно [60] должно выполняться условие $0,24D \leq d \leq 0,6D$, а скорость деформации при динамическом нагружении $\dot{\varepsilon}^d$ значительно (приблизительно на 6 порядков) превышает скорость деформации при статическом нагружении $\dot{\varepsilon}^{st}$.

Например, принимая для статического и динамического нагружений отношение d/D равными по значению, и учитывая, что длительность квазистатического нагружения вместе с выдержкой под нагрузкой τ_{act}^{st} приблизительно составляет 30 с, а длительность динамического нагружения τ_{act}^d от 20 мкс до 80 мкс, отношение $\dot{\varepsilon}^d / \dot{\varepsilon}^{st}$, определяется по (3.42):

$$\frac{\bar{\varepsilon}^d}{\bar{\varepsilon}^{st}} = \frac{\varepsilon^d / \tau_{act}^d}{\varepsilon^{st} / \tau_{act}^{st}} = \frac{\tau_{act}^{st}}{\tau_{act}^d}, \quad (3.42)$$

где $\bar{\varepsilon}^{st}$ и $\bar{\varepsilon}^d$ – средние скорости деформации статическом и динамическом внедрениях.

При этом значение показателя деформационного упрочнения при динамическом нагружении n^d предлагается определять по выражению (3.43):

$$n^d \approx \frac{n^{st}}{\lg\left(\frac{30}{\tau_{act}^d}\right)}, \quad (3.43)$$

где n^{st} – показатель деформационного упрочнения при статическом нагружении, значение которого определяется согласно [42].

3.2 Алгоритм оценки объемной динамической твердости

Для экспериментальной реализации предложенного метода оценки объемной динамической твердости был разработан алгоритм

(последовательность действий) оценки объемной динамической твердости, который в числе прочего реализует вариант 3 расчета характеристики C^2 , описанный в п. 3.1.2.

На рисунках 3.4 – 3.7 представлена блок-схема разработанного алгоритма.

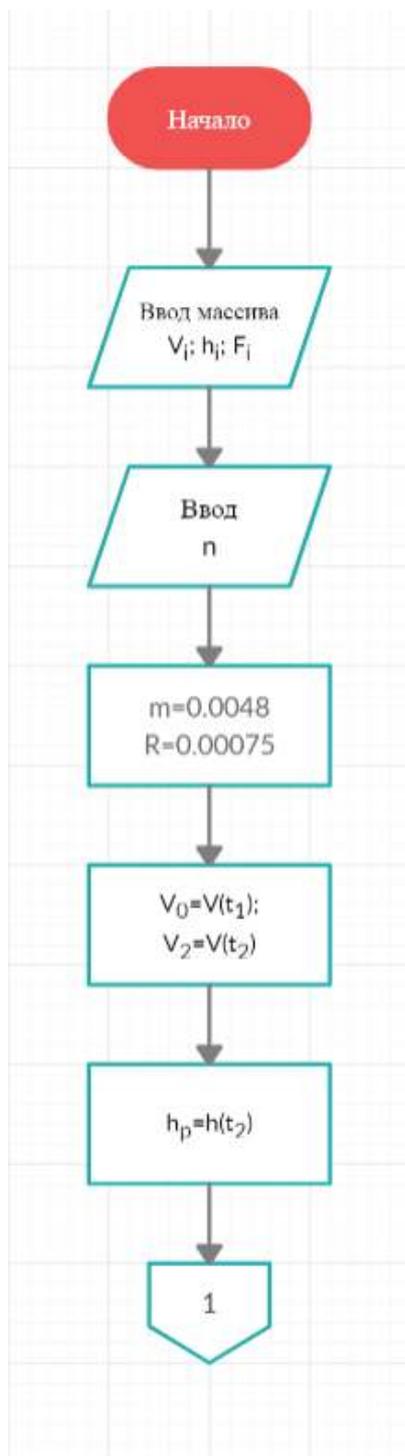


Рисунок 3.4 - Блок схема оценки объемной динамической твердости (часть 1)

Рисунок 3.4 отражает последовательность действий при загрузке массива данных $V(t)$, $h(t)$ и $F(t)$, в оперативную память, а также последовательность действий при загрузке значения показателя деформационного упрочнения материала для дальнейшего учета характера контактного ударного взаимодействия (топографии испытуемого материала). Также здесь производится определение характеристик ударника датчика и выделение параметров контактного ударного взаимодействия из массива данных: V_0 , V_2 и h_p .

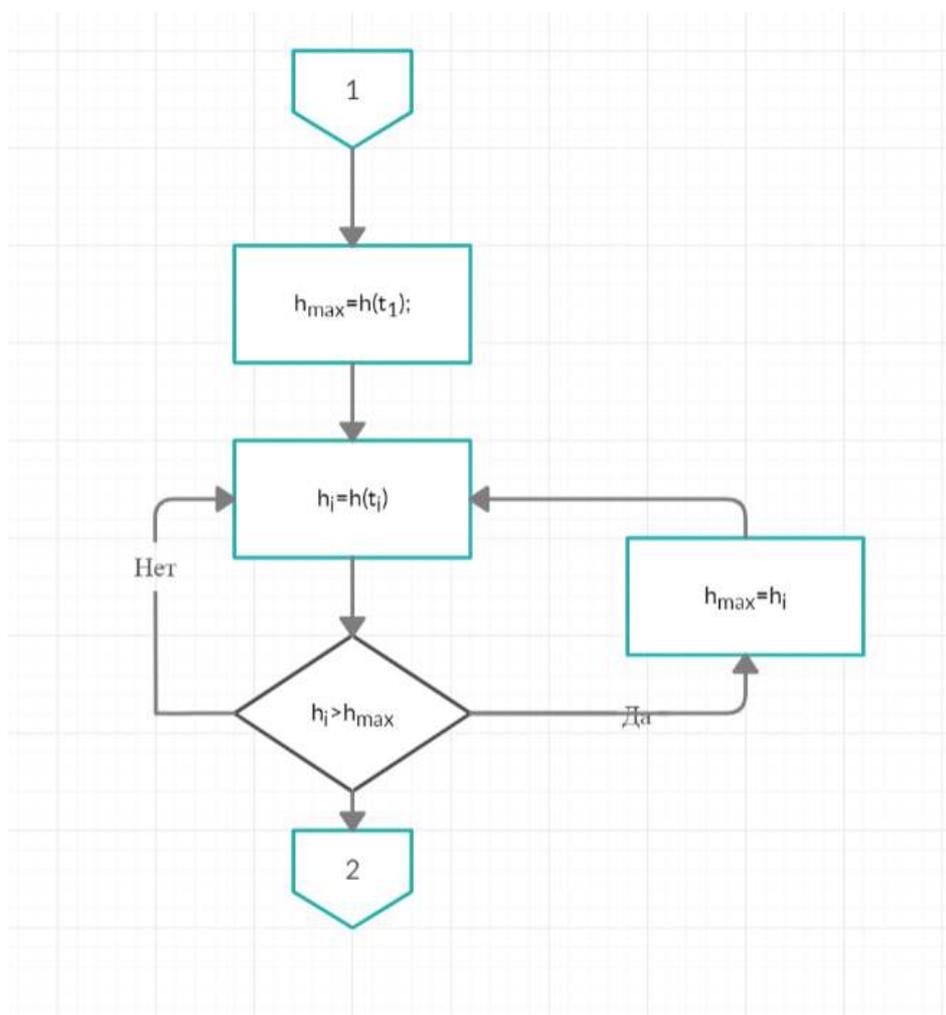


Рисунок 3.5 - Блок схема оценки объемной динамической твердости (часть 2)

Рисунок 3.5 иллюстрирует последовательность действий при выделении в массиве данных параметра максимальная глубина внедрения индентора h_{max} . По окончании поиска происходит переход к следующему шагу алгоритма.

Рисунок 3.6 иллюстрирует последовательность действий при реализации оценки объемной динамической твердости по зависимостям (3.29) и (3.33) до момента учета топографии испытуемого материала.

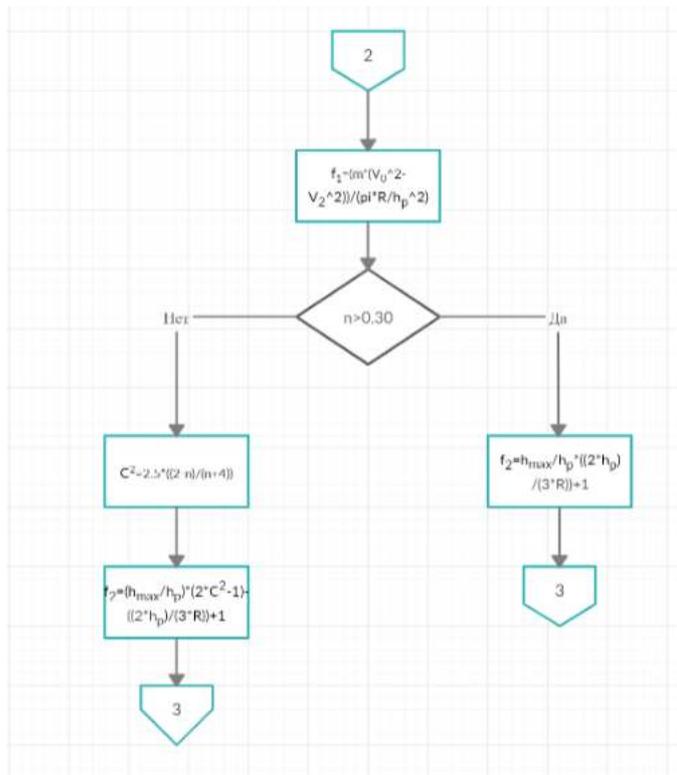


Рисунок 3.6 - Блок схема оценки объемной динамической твердости (часть 3)

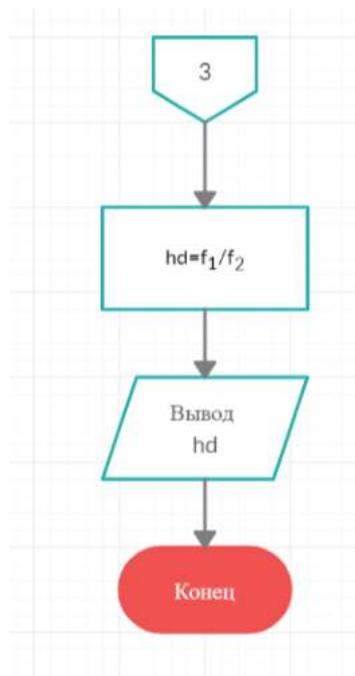


Рисунок 3.7 - Блок схема оценки объемной динамической твердости (часть 4)

Рисунок 3.7 иллюстрирует последовательность действий при продолжении оценки объемной динамической твердости по зависимостям (3.29) и (3.33) с учетом топографии испытуемого материала.

Для практической реализации разработанного алгоритма было доработано существующее ПО «ПО ДИ1» в части добавления перехода от параметров контактного ударного взаимодействия к значениям объемной динамической твердости.

3.3 Апробация алгоритма оценки объемной динамической твердости

Для экспериментальной апробации предложенного алгоритма и ПО оценки объемной динамической твердости был проведен следующий комплекс мероприятий:

- индентирование мер твердости 66НВ, 101НВ, 383НВ с использованием экспериментальной установки КУВ;
- выделение необходимых параметров контактного ударного взаимодействия, получение массива данных $V(t)$, $h(t)$ и $F(t)$ для каждой из мер твердости с использованием «ПО ДИ1»;
- расчет поверхностной динамической твердости в соответствии с [10] с использованием «ИСПГ-1»;
- расчет объемной динамической твердости с использованием «ПО ДИ1»;
- проведение сравнительного анализа полученных результатов.

3.3.1 Расчет параметров контактного ударного взаимодействия МТ

При проведении апробации учитывались следующие факторы [26]:

- МТ 66НВ изготовлена из алюминиевого сплава, статический показатель деформационного упрочнения n^{st} которого согласно ГОСТ 25.503-97 [21] находится в пределах 0,19..0,26;

– МТ 101НВ, 383НВ изготовлены из углеродистой или легированной стали, статический показатель деформационного упрочнения материала n^{st} которых согласно ГОСТ 25.503-97 [21] находится в пределах 0,18..0,25 [26].

С учетом описанных факторов при индентировании всех исследуемых мер твердости будет наблюдаться эффект «pile-up» / «навал» [26].

Параметры контактного ударного взаимодействия для МТ приведены в таблице 3.2

Таблица 3.2 – Параметры контактного ударного взаимодействия МТ

МТ	F_{hmax}	V_0	V_2	h_p	h_{max}	τ_{act}	n^{st}	C^2
66 НВ	94,19	0,90	0,26	32,30	36,46	63,55	0,23	1,05
101 НВ	141,53	0,90	0,27	20,31	24,03	41,50	0,22	1,05
383 НВ	215,92	0,90	0,51	10,60	16,55	28,60	0,22	1,05

3.3.2 Расчет динамической твердости МТ

При расчете поверхностной динамической твердости использовались положения [10] и прибор ДИ с ПО «ИСПГ-1».

При расчете объемной динамической твердости использовалось разработанное «ПО ДИ1» [26].

Расчет поверхностной и объемной динамических твердостей для МТ 66НВ, 101НВ, 383НВ приведены в таблице 3.3 [26]. В таблице 3.3 использованы следующие обозначения: среднее значение \bar{q} и выборочное стандартное отклонение $s(\bar{q})$.

Таблица 3.3 – Расчет динамической твердости МТ [26]

МТ 66НВ	$HD_{IT}^{(S)}$, МПа	$HD_{IT}^{(V)pile-up}$, МПа
1	464,46	708,77
2	637,47	674,12
3	538,60	665,49
4	512,53	702,89
5	528,97	712,17
6	541,82	726,86
7	506,83	719,35
8	492,55	645,15
9	530,84	741,48
10	584,35	666,74
\bar{q}	533,81	696,30
$s(q)$	48,43	31,43
МТ 101НВ	$HD_{IT}^{(S)}$, МПа	$HD_{IT}^{(V)pile-up}$, МПа
1	1114,70	1770,07
2	872,43	1678,38
3	1332,87	1654,75
4	1011,10	1768,01
5	1542,47	1497,59
6	1183,30	2015,50
7	1320,93	1868,32
8	1267,87	1652,94
9	1527,48	1796,27
10	1009,40	1652,24
\bar{q}	1218,26	1735,41
$s(q)$	222,35	142,25
МТ 383НВ	$HD_{IT}^{(S)}$, МПа	$HD_{IT}^{(V)pile-up}$, МПа
1	3688,95	3828,90
2	3726,00	3835,23
3	3633,17	3699,44
4	3716,29	3915,25
5	4256,26	3856,76
6	3871,94	3951,63
7	3773,94	4102,10
8	3925,88	3859,00
9	3867,80	3846,28
10	3341,46	3848,32
\bar{q}	3780,17	3884,29
$s(q)$	234,15	106,05

3.3.3 Сравнительный анализ результатов

При апробации алгоритма оценки объемной динамической твердости на мерах твердости по Бринеллю были получены следующие результаты [27].

Выборочное стандартное отклонение значений объемной динамической твердости существенно ниже выборочного стандартного отклонения поверхностной динамической твердости [26].

Значения, полученные с использованием «ПО ДИ1» соотносятся, как со значениями твердости, полученных с использованием «ИСПГ-1», так и с заданными характеристиками мер твердости.

Таким образом с помощью разработанного алгоритма оценки объемной динамической твердости и ПО имеется возможность достоверной оценки динамической твердости.

3.4 Переход от показателей объемной динамической твердости к статической твердости по Бринеллю

Величина твердости H , которая с физической точки зрения является мерой сопротивления вдавливанию индентора, представляет собой функцию деформации ε , скорости деформации $\dot{\varepsilon}$ и коэффициента деформационного упрочнения n . Выражения для статической твердости по Бринеллю HB и объемной динамической твердости $HD_{IT}^{(v)}$ в обобщенном виде можно представить в следующей форме [27]:

$$HD_{IT}^{(v)} = HB(\varepsilon; \dot{\varepsilon}; n). \quad (3.44)$$

С учетом анализа работы [51] был сделан вывод о существенном различии в значениях скорости статической деформации (скорости деформации при статическом нагружении) $\dot{\varepsilon}^{(st)}$ и скорости динамической деформации (скорости деформации при динамическом нагружении) $\dot{\varepsilon}^{(d)}$.

Тогда связь статической твердости по Бринеллю и объемной динамической твердости можно представить выражением (3.45):

$$HD_{IT}^{(v)} = \eta \cdot g \cdot HB, \quad (3.45)$$

где η – коэффициент динамичности;

g – ускорение свободного падения.

Тогда при переходе от значений объемной динамической твердости к значениям статической твердости справедливо (3.46):

$$HB = \frac{HD_{IT}^{(v)}}{\eta \cdot g}. \quad (3.46)$$

Также стоит отметить, существенное влияние на значение твердости оказывает форма кристаллической решетки материала. Согласно [42] алюминий, медь и их сплавы имеют гранецентрированную кубическую решетку, в то время как сталь и ее сплавы – объемно центрированную кубическую решетку, а титан и сплавы имеют гексагональную плотноупакованную решетку, что также необходимо учитывать.

Тогда, исходя из приведенной информации, коэффициент динамичности существенно зависит:

- от соотношения скоростей деформации при статическом и динамическом индентировании;
- от структуры кристаллической решетки исследуемого материала.

С учетом рекомендаций [42] можно определить значение коэффициента динамичности по следующей зависимости (3.47):

$$\eta = \frac{HD_{IT}^{(v)}}{HD_{IT}^{(v)} - K \cdot \ln\left(\frac{\varepsilon^{(d)}}{\varepsilon^{(st)}}\right)}, \quad (3.47)$$

где K – коэффициент, являющийся функцией свойств контролируемого материала, а также его кристаллической структуры.

Определение значений коэффициента K производится методом регрессионного анализа и свойствами контролируемого материала, полученных на основе эмпирических или теоретических моделей деформирования.

3.5 Выводы по главе 3

1. Впервые предложен энергетический подход к оценке объемной динамической твердости, принципиальное значение которого от существующих в том, что при оценке твердости учитывается не площадь поверхности отпечатка контактного ударного взаимодействия, а весь его объем.

2. При оценке динамической твердости также предложено учитывать эффект, связанный с топографией материала, при контактном ударном взаимодействии индентора с упругопластическим полупространством.

3. С использованием алгоритма и ПО оценки объемной динамической твердости проведены экспериментальные исследования, результаты которых подтвердили их работоспособность и адекватность получаемых результатов.

4. Предложена модель количественной взаимосвязи между показателем динамической твердости и показателем статической твердостью по Бринеллю.

ГЛАВА 4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ АПРОБАЦИЯ РАЗРАБОТАННЫХ АЛГОРИТМОВ И МЕТОДА ПРИ КОНТРОЛЕ ТВЕРДОСТИ МАТЕРИАЛОВ ИЗДЕЛИЙ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЕКАНИЯ

4.1 Анализ контролируемых параметров и источников неопределенности результатов измерений показателей твердости

Расчет значений динамической твердости с использованием метода динамического индентирования сопровождается наличием источников неопределенности результатов измерений, вследствие чего минимальное отклонение параметров приводит к большим значениям погрешности при обработке результатов измерения [22].

Процесс получения значений твердости условно можно разделить на три этапа: индентирование, первичная обработка сигнала ЭДС и непосредственно сама оценка динамической твердости.

В ходе первого этапа производится индентирование в материал исследуемого образца, результатом которого является получение зависимости ЭДС от времени индентирования. В ходе второго этапа происходит первичная обработка сигнала ЭДС, где происходит получение зависимостей изменения скорости от времени, изменения контактного усилия от времени и изменения перемещения индентора от времени. В ходе третьего этапа происходит дальнейшая обработка полученного массива данных, а именно оценка параметров контактного ударного взаимодействия и оценка объемной динамической твердости испытуемого материала.

Исходя из особенностей, источники неопределенности результатов измерений метода динамического индентирования можно разделить на три категории [76]:

- аппаратные источники неопределенности, связанные со средством контроля;
- источники, связанные с внешними факторами;

– методические источники неопределенности, связанные с допущениями в методике расчета.

4.1.1 Аппаратные источники неопределенности результатов измерений

Характеристики ударника датчика. В соответствии с п. 1.3 существует 2 типа датчиков ДИ. Первый тип - датчик с гравитационным разгоном индентора, второй – датчик с предварительным разгоном индентора. При расчете значений твердости и других механических характеристик, в числе прочих, учитываются и характеристики ударников датчиков. Характеристики ударников рассмотренных датчиков приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Характеристики ударников датчиков

Тип	с гравитационным разгоном	с предварительным разгоном
масса ударника, г	4,80	4,80
радиус индентора, мм	0,75	0,75
жесткость пружины, Н/м	-	36,75
v мах, м/с	0,89	2,10
E кинетическая мах, мДж	1,90	10,58

Очевидно, что некоторые из приведенных характеристик приведены в приближенном виде и в реальности могут не в полной мере соответствовать указанным значениям. В первую очередь, такой характеристикой является жесткость пружины. Также со временем и радиус индентора от многократного внедрения в материал может исказить форму относительно заданной.

Для уменьшения неопределенности результата измерений следует периодически производить внешний осмотр датчика с использованием оптического оборудования и при необходимости производить корректировку формы индентора или вносить поправочные коэффициенты при расчете значений твердости.

Форма индентора. Более подробно стоит рассмотреть такую характеристику ударника как форма индентора. Функция формы индентора A_p используется при расчете значений твердости материала исследуемого образца. Полагается, что индентор имеет форму идеальной сферы. Однако, с течением времени индентор может изменять свою форму относительно первоначальной. Для учета изменения формы индентора может применяться оптическая оценка состояния индентора и механическая корректировка его формы при возникающей необходимости.

Позиционирование исследуемого образца. Так как прибор динамического индентирования является портативным и безобразовым, с его помощью можно проводить контроль изделий практически любых геометрических форм и размеров. При этом, при контроле малогабаритных образцов, при процессе контактного ударного взаимодействия индентора с испытуемым материалом создается, так называемый «подскок» образца в следствие приложениа существенной энергии на небольшую площадь образца. Особенно, такой эффект характерен для датчиков с предварительным разгоном, где кинетическая энергия удара на порядок больше энергии датчика с гравитационным разгоном (см. таблицу 4.1). Для уменьшения неопределенности результата в данной части следует производить притирку образца к более массивному объекту (например, к стальной плите).

4.1.2 Влияние механических свойств исследуемых объектов и мешающих параметров

Допущение об изотропии свойств. Как известно, поверхностные свойства любого материала отличаются от его объемных свойств. Данные отличия могут быть обусловлены не только природой материала, но и внешними факторами, такими как загрязнение поверхности, окисление, последствия других испытаний и т.д. При расчете значений твердости и других механических характеристик с использованием ДИ вводится допущение и изотропии свойств материала не только по всей площади, но и по всему объему исследуемого образца.

Шероховатость поверхности. Несмотря на то, что метод динамического индентирования является портативным и может использоваться в полевых условиях, определенные требования по шероховатости поверхность испытуемого образца должны быть соблюдены [23].

При этом требования к состоянию поверхности согласно ГОСТ Р 56474-2015 [10] при динамическом индентировании определены следующим соотношением (4.1):

$$h \geq 20Ra, \quad (4.1)$$

где Ra – среднеарифметическое значение неровностей поверхности.

Также во избежание влияния свойств основания на измеряемые свойства материала, требуется выполнение условия: максимальная глубина внедрения индентора должна быть менее 1% от общей толщины образца.

Геометрия контакта при упругопластическом внедрении. Существует допущение (в том числе в рамках настоящих диссертационных исследований), что при внедрении происходит только упругопластическая деформация материала. Однако в начале процесса контактного ударного взаимодействия фиксируется стадия упругой деформации. Отмечено, что данная стадия не превышает 2% от всего времени внедрения индентора, тем не менее данный факт стоит учитывать при дальнейших исследованиях описания процесса контактного ударного взаимодействия.

Также при индентировании у материалов с высокой степенью пластичности при индентировании образуются характерные навалы, по периметру отпечатка, а для материалов с высокой степенью упругости, наоборот, по периметру отпечатка образуется прогиб. Данные эффекты в литературе носят названия «pile-up» и «sink-in» соответственно и были описаны в п 3.1 настоящих диссертационных исследований.

Проведенные экспериментальные исследования показали, что доля «навалов» или «прогибов» относительно всего объема восстановленного

отпечатка составляет порядка 10% (было рассмотрено 50 отпечатков различных материалов).

Данный факт позволяет сделать вывод о том, что учет эффектов «sink-in» и «pile-up» повышает достоверность итогового результата.

Подавление помех и наводок. Так как в основе процесса динамического индентирования лежит регистрация процесса с использованием катушки индуктивности, имеет место возникновение электромагнитных помех и наводок, результатом которых может стать, как ложное срабатывание катушки индуктивности, так и незаметное наведение помех при работе с прибором ДИ от находящихся рядом электронных приборов.

Для уменьшения неопределенности следует более тщательно оценивать данные риски и выбор времени и места проведения испытаний.

4.1.3 Методические составляющие неопределенности результатов измерений

На суммарную неопределенность результатов измерений влияют следующие факторы.

Нахождения границ этапов индентирования. Здесь – программный поиск границ временных периодов активного контактного взаимодействия и пассивного контактного взаимодействия. Чем точнее реализовано выделение указанных этапов индентирования, тем точнее в дальнейшем будет произведен расчет параметров контактного ударного взаимодействия.

При этом в соответствии с [10], численные данные, регистрируемые с помощью прибора ДИ, должны представлять собой набор дискретных значений контактного усилия, глубины внедрения индентора и скорости перемещения индентора с привязкой ко времени. Выборка значений должна осуществляться через временной интервал, не больший, чем $0,01 \tau_{act}$.

Учет коэффициента пропорциональности. При переходе от значений ЭДС к значениям скорости согласно формуле 1.1 используется коэффициент пропорциональности k , который является константой в каждый момент времени процесса. Анализ физического процесса данного этапа позволяет

делать вывод о возможности уточнения данного коэффициента при каждом переходе от значения ЭДС к значениям скорости, что позволит снизить неопределенность результатов. Более того в рамках настоящих диссертационных исследований был предложен переход к нормированным значениям параметров контактного ударного взаимодействия, что позволит полностью уйти от учета данного коэффициента.

Топографические факторы. Здесь стоит отметить, что объемная динамическая твердость в соответствии с алгоритмами, изложенными в п 3.1-3.2 рассчитывается согласно следующим зависимостям (4.2-4.3):

$$HD_{IT}^{(V) \text{sink-in}} = \frac{m(V_0^2 - V_2^2)}{\pi R h_p^2 \left(\frac{h_{max}}{h_p} - \frac{2h_p}{3R} + 1 \right)}, \quad (4.2)$$

$$HD_{IT}^{(V) \text{pile-up}} = \frac{m(V_0^2 - V_2^2)}{\pi R h_p^2 \left(\frac{h_{max}}{h_p} + (C^2 - 1) - \frac{2h_p}{3R} + 1 \right)}. \quad (4.3)$$

В приведенные зависимости входят следующие компоненты:

$m, V_0, V_2, \pi, R, h_p, h_{max}$ – при расчете динамической твердости при эффекте прогиб [26].

$m, V_0, V_2, \pi, R, h_p, h_{max}, C$ – при расчете динамической твердости при эффекте навал [26].

При этом m, R - характеристики ударника и, являясь величинами постоянными, наряду с константой π не зависят от метода расчета динамической твердости.

V_0, V_2, h_{max} являются величинами прямого измерения. Более того, значения этих величин также входят в зависимость при существующем расчете поверхностной динамической твердости.

Поэтому при эффекте «прогиб» на неопределенность результатов будет влиять величина h_p , а при эффекте «навал» - величина h_p и C^2 .

При этом исследования, связанные с оценкой характеристики C^2 приведены в главе 3 настоящих диссертационных исследований.

4.2 Экспериментальные исследования перехода от показателей объемной динамической твердости к статической твердости по Бринеллю

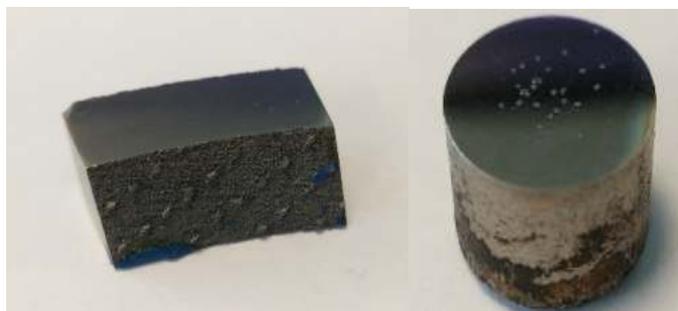
В соответствии с теоретическими исследованиями, приведенными п. 3.4, при сравнительном анализе показателей динамической и статической твердостей можно использовать зависимость $HB = \frac{HD_{IT}^{(v)}}{\eta \cdot g}$, где η – коэффициент динамичности, рассчитывающийся по формуле (4.4):

$$\eta = \frac{HD_{IT}^{(v)}}{HD_{IT}^{(v)} - K \cdot \ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}^{(d)}}{\dot{\varepsilon}^{(st)}}\right)}. \quad (4.4)$$

При этом коэффициент динамичности рассчитывается с учетом характеристик исследуемого материала (коэффициент K), значение которого может быть найдено экспериментально для заданной группы материалов.

В настоящих диссертационных исследованиях рассматриваются жаропрочные материалы аддитивного производства, используемые на предприятиях РКТ, а именно изделия, выполненные СЛС, где наибольшее применение находят хром-никелевые и титановые сплавы. Для таких материалов был экспериментально рассчитан коэффициент K для дальнейшего использования.

Для проведения соответствующих испытаний были взяты соответствующие выращенные образцы, изготовленные из титанового и никелевого сплавов (рисунок 4.1 (а), рисунок 4.1 (б) соответственно).



а)

б)

Рисунок 4.1 – Внешний вид образцов для испытаний:

а) титановый сплав – образец 1;

б) никелевый сплав – образец 2

Измерение динамической твердости производилось с использованием экспериментальной установки контактного ударного взаимодействия и ПО «ПО ДИ1». Измерение статической твердости по Бринеллю проводилось с использованием твердомера Struers Duramin-3000 (рисунок 4.2) со следующими характеристиками внедрения: время нагружения 10 с, нагрузка 1000 кгс, диаметр индентора 10 мм. Эксперимент в части измерений на твердомере Struers Duramin 3000 проводился в рамках семинара «Новейшие разработки в области аналитического оборудования для исследования и контроля качества материалов», ООО «Мелитэк», г. Санкт-Петербург.



Рисунок 4.2 – Внешний вид Struers Duramin 3000 [54]

$\dot{\epsilon}_{st}$ согласно формуле Тейбора [75] рассчитывается как $\dot{\epsilon}_{st} = 0,2 * \frac{\Delta d_s}{\tau_{act}}$, где Δd_s – отношение диаметра остаточного отпечатка к диаметру индентора. При этом согласно рекомендациям ISO 6506-1:2014 [60] для метода определения твердости по Бринеллю должна соблюдаться зависимость: $0,24 < \Delta d_{st} < 0,6$. В рамках испытаний принято следующее допущение $\Delta d_{st} = 0,42$.

$\dot{\epsilon}_d$ также рассчитывается согласно [75] $\dot{\epsilon}_d = 0,2 * \frac{\Delta d_d}{\tau_{act}}$.

Для поиска отношений Δd_d для образцов был проведен металлографический анализ остаточных отпечатков динамического

индентирования. На рисунке 4.3 приведен металлографический снимок остаточного отпечатка образца 1, из которого видно, что радиус отпечатка индентирования равен 0,27 мм, тогда как радиус индентора равен 0,75 мм. Отсюда получаем диаметр 0,54 и 1,50 соответственно. Тогда $\Delta d_{d1} = 0,36$. Аналогично получаем для второго образца $\Delta d_{d2} = 0,32$.

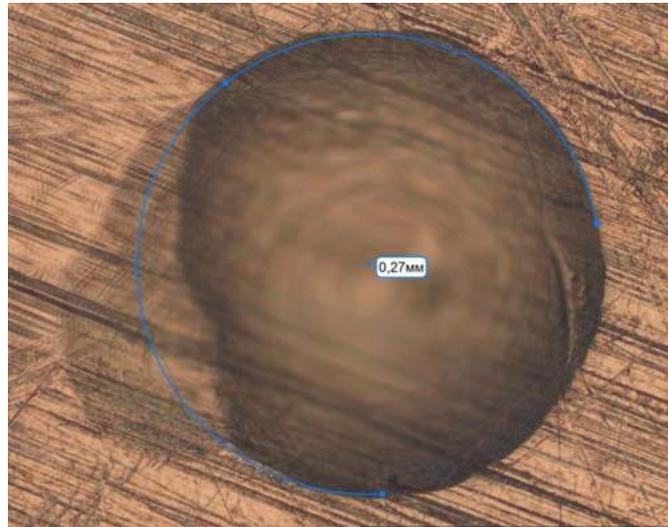


Рисунок 4.3 – Металлографический снимок образца 1

Для экспериментального расчета коэффициента K преобразуем формулу (3.47):

$$K = \frac{HD_{IT}^{(v)} - \frac{HD_{IT}^{(v)}}{\eta}}{\ln\left(\frac{\dot{\epsilon}_d}{\dot{\epsilon}_{st}}\right)} \quad (4.5)$$

В таблице 4.2 приведены экспериментально полученные и рассчитанные параметры эксперимента, в том числе коэффициент K для образцов 1 и 2.

Таблица 4.2 – Параметры образцов

№ образца	$\tau_{act}(st)$	$\tau_{act}(d)$	Δd_s	Δd_d	HB	$HD_{IT}^{(v)}$	η	$\dot{\epsilon}_{st}$	$\dot{\epsilon}_d$	K
1	10	$45 \cdot 10^{-6}$	0,42	0,36	343	3676	1,07	$8,4 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^3$	19,78
2	10	$35 \cdot 10^{-6}$	0,42	0,32	393	4184	1,06	$8,4 \cdot 10^{-3}$	$1,8 \cdot 10^3$	19,29

Экспериментально полученные коэффициенты K , учитывающие характеристики материалов титановых и никелевых сплавов, будут использованы при дальнейших диссертационных исследованиях.

4.3 Экспериментальные исследования определения динамической твердости материалов изделий, выполненных по аддитивным технологиям

4.3.1 Общие положения

Для отработки предложенных в настоящей диссертационной работе моделей и алгоритмов расчета объемной динамической твердости и подтверждения их работоспособности на реальных изделиях аддитивного производства были проведены следующие экспериментальные исследования.

В качестве изделий, выполненных по аддитивным технологиям, выступили изделия, выполненные методом селективного лазерного спекания (образцы СЛС), на установке послойного лазерного спекания на предприятии АО «Композит», Московская область, г. Королев. Внешний вид и характеристики образцов СЛС приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Образцы СЛС

Обозначение образца СЛС	Примечание	Внешний вид
СЛС 1	Титановый сплав ВТ6; пористость 0,0014%	
СЛС 2	Никелевый сплав ЭК61; включения 0,0003%	

Для сравнения результатов объемной динамической твердости со стандартными числами твердости в качестве сравнительного метода использовался метод Бринелля.

4.3.2 Порядок проведения

Порядок проведения экспериментальных исследований для каждого из образцов СЛС выглядит следующим образом:

1. Подготовка образца.
2. Проведение измерений на образце с использованием экспериментальной установки КУВ и «ПО ДИ1»; получение значений динамической твердости с использованием метода оценки объемной динамической твердости.
3. Проведение измерений образца с использованием твердомера по Бринеллю; получение значений статической твердости по Бринеллю.
4. Проведение сравнений значений твердости, полученных с помощью экспериментальной установки КУВ со значениями твердости, полученных с помощью твердомера по Бринеллю.

В рамках подготовки к проведению экспериментальных исследований было выполнено следующее:

- поверхность образца очищена от загрязнений и тщательно протерта ветошью, слегка смоченной в спиртовом растворе;
- проведена разметка поверхности образца с указанием зон контроля карандашом с мягким грифелем;
- проведено притирание образца к массивной металлической конструкции для минимизации наводок.

В рамках проведения измерений на образце с использованием экспериментальной установки КУВ выполнено следующее:

- проведено измерение во всех зонах контроля, после каждого из которых получен результат оценки значения динамической твердости;
- записаны результаты параметров контактного ударного взаимодействия в соответствующие протоколы измерений;

– произведена оценка значений объемной динамической твердости с учетом параметров контактного ударного взаимодействия и особенностей топографии поверхности;

– записаны результаты полученных значений объемной динамической твердости в соответствующие протоколы измерений;

– произведен переход значений объемной динамической твердости к значениям статической твердости с использованием коэффициента динамичности по зависимости (3.46);

– записаны результаты полученных значений статической твердости в соответствующие протоколы измерений.

В рамках проведения измерений объекта контроля с использованием твердомера по Бринеллю выполнено следующее:

– проведены измерения твердости согласно эксплуатационной документации на твердомер;

– записаны полученные значения статической твердости в соответствующие протоколы измерений.

4.3.3 Полученные результаты

Результаты, полученные в рамках реализации порядка проведения, описанного в п. 4.3.2 приведены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Результаты значений объемной динамической твердости

	Минимальное значение твердости, МПа	Максиальное значение твердости, МПа	Среднее значение твердости, МПа
СЛС 1	3217	3650	3441
СЛС 2	3450	3919	3520

Результаты контроля образцов на твердомере по Бринеллю приведены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 - Результаты значений статической твердости по Бринеллю

	Минимальное значение твердости, НВ	Максимальное значение твердости, НВ	Среднее значение твердости, НВ
СЛС 1	317	364	347
СЛС 2	344	373	360

4.3.4 Обработка и анализ полученных результатов

Переход от показателей объемной динамической твердости к показателям статической твердости по Бринеллю в соответствии п. 3.4 с использованием результатов расчета коэффициента динамичности (п. 4.2) приведены в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Значения чисел твердости в единой шкале

		Статическая твердость по Бринеллю, НВ	Твердость по Бринеллю (по формуле 19.1), НВ*
СЛС 1	разброс	317-364	297-348
	средн. значение	347	328
СЛС 2	разброс	344-373	332-376
	средн. значение	360	339

Также была рассчитана относительная погрешность полученных результатов. Опорным значением выступили значения статической твердости по Бринеллю.

Относительная погрешность измерения твердости рассчитывалась по формуле (4.6):

$$\delta = \frac{|HB^* - HB|}{|HB|} \cdot 100\%, \quad (4.6)$$

где НВ* - приведенное значение объемной динамической твердости в шкале твердости по Бринеллю;

НВ- значение статической твердости по Бринеллю.

Результаты расчета относительной погрешности для СЛС 1 и СЛС 2 представлены в таблице 4.7.

Таблица 4.7 – Относительная погрешность расчета

	Относительная погрешность
СЛС 1	6 %
СЛС 2	7 %

Анализ полученных результатов показал, что экспериментальные значения объемной динамической твердости близки к экспериментальным значениям статической твердости по Бринеллю.

Тем самым результаты экспериментальной апробации показали работоспособность алгоритмов, разработанных в рамках настоящих диссертационных исследований для оценки объемной динамической твердости материалов реальных изделиях аддитивного производства.

4.4 Выводы по главе 4

1. Приведен анализ контролируемых параметров и источников неопределенности результатов измерений динамического индентирования.

2. В рамках экспериментальных исследований проведен расчет значений объемной динамической твердости титановых и никелевых сплавов изделий селективного лазерного спекания

3. Приведен сравнительный анализ результатов экспериментальных исследований с результатами измерения значений статической твердости по Бринеллю.

4. Анализ полученных результатов указал на возможность применения разработанных в рамках диссертационной работы, моделей и алгоритмов при расчете значений объемной динамической твердости на изделиях аддитивного производства.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках настоящей диссертационной работы, представляющей собой законченную научно-квалифицированную работу, на основе совершенствования метода динамического индентирования и средства контроля твердости решена актуальная научно-техническая задача – повышение точности измерений при контроле твердости материалов изделий, выполненных по аддитивным технологиям. На основании проведенных исследований получены следующие научные результаты:

1. Обоснована актуальность применения метода динамического индентирования для достоверного контроля твердости металлических материалов изделий, в том числе изделий аддитивного производства, при этом отмечены области метода, нуждающиеся в дальнейшем развитии.

2. Предложена расчетно-экспериментальная модель движения индентора, разработан алгоритм и программное обеспечение, позволяющие производить переход от исходного сигнала ЭДС, получаемого с магнитоиндукционного преобразователя, к параметрам контактного ударного взаимодействия сферического индентора с испытываемым материалом.

3. Разработан метод экспериментальной оценки объемной динамической твердости, учитывающий топографию деформационной поверхности, для перехода от объемной динамической твердости к статической твердости по Бринеллю предложено использовать аналитическую зависимость, учитывающую скорость деформации и форму кристаллической решетки материала.

4. Результаты экспериментальной апробации разработанных алгоритмов и методов показали возможность их применения для контроля твердости материалов изделий, в том числе получаемых с использованием технологий селективного лазерного спекания. Анализ полученных результатов экспериментальных исследований, проведенных в рамках диссертационной работы, показал на возможность применения разработанных

моделей и алгоритмов при расчете значений объемной динамической твердости на реальных изделиях аддитивного производства.

5. Перспективными разработками данной темы являются разработки, связанные с созданием специализированного датчика и первичного преобразователя, конструкция которых будет учитывать специфические особенности материалов изделий, выполненных по аддитивным технологиям.

6. Развитием настоящей темы диссертационных исследований видится создание прибора динамического индентирования полностью российского производства, который в числе прочего будет базироваться на алгоритмическом и программном обеспечении, созданного в рамках настоящей диссертационной работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аширова, А.Д. Возможности применения портативных твердомеров для неразрушающего контроля механических свойств покрытий / А.Д. Аширова. К.В. Гоголинский, А.А. Никазов // XXII Всероссийская конференция по НК и ТД. Секция 4. Контроль характеристик и НДС материалов. 3-5 марта 2020 г., с. 181-184.

2. Булычев, С.И. Переход от диаграмм вдавливания к диаграммам растяжения с учетом упрочненного поверхностного слоя // Деформация и разрушение материалов. 2010. № 2. С. 43-48.

3. Булычев, С.И. Твердость и гистерезис на пределе текучести // Деформация и разрушение материалов. 2011. № 1. С. 41-45.

4. Быханов, С. «К.У.П.О.Л.» - система управления производственными процессами для «Индустрии 4.0» // Control Engineering. Россия. №5 (83), 2019 г., с. 62-65.

5. Гегузин, Я. Е. Макроскопические дефекты в металлах / Я. Е. Гегузин. – 1962.251 с.

6. Гоголинский, К.В. Метрологическое обеспечение динамических методов измерения твердости в Российской Федерации: существующие проблемы и пути их решения / К.В. Гоголинский, В.А. Сясько. // В Мире неразрушающего контроля. – 2014. – № 1(63). С. 69–75.

7. Гнутенко Е.В. Влияние шероховатости поверхности на точность измерения толщины покрытия / Е.В. Гнутенко, В.А. Рудницкий. // Неразрушающий контроль и диагностика. 2014. №3, С. 46-54.

8. ГОСТ Р 58600-2019. Аддитивные технологии. Неразрушающий контроль металлических изделий, изготовленных методами аддитивных технологий. Основные положения.

9. ГОСТ Р 58419-2019. Аддитивные технологии. Изделия из титановых сплавов, изготовленные методом селективного электронно-лучевого сплавления.

10. ГОСТ Р 56474-2015. Системы космические. Контроль неразрушающий физико-механических свойств материалов и покрытий космической техники методом динамического индентирования. Общие требования.

11. ГОСТ Р 57558-2017/ISO/ASTM 52900:2015. Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы Часть 1. Термины и определения.

12. ГОСТ 2999-75. Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Виккерсу.

13. ГОСТ 9450-76 (СТ СЭВ 1195-78). Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников.

14. ГОСТ 9013-59 (ИСО 65908-86). Металлы. Метод измерения твердости по Роквеллу.

15. ГОСТ 9012-59. Металлы. Метод измерения твердости по Бринеллю.

16. ГОСТ 23273-78. Металлы и сплавы. Измерение твердости методом упругого отскока бойка (по Шору).

17. ГОСТ Р 56232-2014. Определение диаграммы «напряжение – деформация» методом инструментального индентирования шара. Общие требования.

18. ГОСТ 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.

19. ГОСТ Р ИСО 4545-1-2015. Материалы металлические. Определение твердости по Кнупу. Часть 1. Метод испытания.

20. ГОСТ Р ИСО 8568-2010. Стенды ударные. Заявление подтверждение характеристик.

21. ГОСТ 25.503-97. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Метод испытания на сжатие.

22. ГОСТ 34100.1-2017. Неопределённость измерений. Часть 1. Введение в руководства по выражению неопределенности измерения.

23. ГОСТ 2789-73. Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики.

24. Декард Карл Р. Патент на изобретение «Способ изготовления детали и устройство для его осуществления», Борд оф Риджентс, Дзе Юниверсити оф Тексас Систем (US), заявка №4356082/02, 1988.06.16.

25. Дрозд, М.С., Инженерные расчеты упругопластической контактной деформации / М.С. Дрозд, М.М. Матлин, Ю.И. Сидякин // М.: Машиностроение, 1986. – 224 с.

26. 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.

27. 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.

28. Ильинский, А.В. Оценка возможности применения оптического метода в задаче регистрации кинематических характеристик процесса динамического индентирования / А.В. Ильинский, Е.И. Иванова, А.В. Федоров, Н.В. Астрединова, Д.С. Ашихин // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики -2017. - Т. 17. - № 4(110). - С. 620-627.

29. Коробенков А. Цифровая система управления производством – важный шаг к «Индустрии 4.0» // Технологии в электронной промышленности. №7. 2016 г., с. 50-52.

30. 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.

31. Крень, А.П. Моделирование ударного контакта индентора с нежесткими стальными конструкциями при измерении твердости / А.П. Крень, В.А. Рудницкий, Н.В. Зинкевич // Известия национальной академии наук Беларуси. Серия Физико-технических наук. – 2017. - №4. – С. 38-45.

32. Крень, А.П. Контроль физико-механических характеристик чугуна прибором ИФМХ-Ч / В.А. Рудницкий, Г.А. Ланцман, М.Н. Делендик, Н.В. Зинкевич, Е.В. Гнутенко // Литье и металлургия. 2019. № 3. С. 65-69.

33. Крень, А.П. Определение показателя деформационного упрочнения металлов на основании закона Мейера / А.П. Крень // Приборостроение: материалы 11-й Международной научно-технической конференции, 14-16 ноября 2018 года, Минск, РРеспублика Беларусь. – Минск: БНТУ, 2018. – С. 24-26.

34. Марусин, М.П. Разработка первичного преобразователя прибора динамического индентирования для измерения механических свойств материалов / М.П. Марусин, Т.А. Протасеня // Известия вузов. Приборостроение. 2014. Т. 57. № 10. С. 85–87.

35. Мацулевич, О.В. Определение прочности бетонов методом динамического индентирования / О.В. Мацулевич, В.А. Рудницкий // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2013. № 2. С.52–60.

36. Мильман, Ю.В. Энергетическая концепция твердости при инструментальном индентировании / Ю.В. Мильман, К.Э. Гринкевич, П.В. Мордель // Деформация и разрушение материалов. 2013. № 1. С. 2-9.,

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

38. Мощенок, В.И. Современная классификация методов определения твердости / В.И. Мощенок // Автомобильный транспорт. Вып. 25. 2010. С. 129-132.

39. Огар, П.М. Энергетический подход к определению твердости материалов при индентировании сферой / П.М. Огар, В.А. Тарасов, И.Б. Федоров // Механика XXI века. 2013. № 12. С. 66-70.

40. Огар, П.М. Энергетическая концепция твердости при кинетическом индентировании сферой / П.М. Огар, В.А. Тарасов, И.Б. Федоров // Системы. Методы. Технологии. 2014 № 2 (22) с. 36-41.

41. Попович, А.А. Применение лазерно-ультразвукового метода для исследования характеристик изделий, полученных аддитивными технологиями / Д.В. Масайло, В.Ш. Суфияров, Е.В. Борисов, И.А. Полозов, В.А. Быченко, И.Ю. Кинжагулов, И.В. Беркутов, Д.С. Ашихин, А.В. Ильинский // Дефектоскопия - 2016. - № 6. - С. 3-10. (Popovich, A.A. A laser ultrasonic technique for studying the properties of products manufactured by additive technologies / A.A. Popovich, D.V. Masaylo, V. Suffiarov, E.V. Borisov, I.A. Polozov, V.A. Bychenok, I.Y. Kinzhagulov, I.V. Berkutov, D.S. Ashikhin, A.V. Il'inskii // Russian Journal of Nondestructive Testing. - 2016. - Vol. 52. - N. 6. - PP. 303-309).

42. Потапов, А.И. Обеспечение единства измерений твердости динамическим методом в Российской Федерации / А.И. Потапов, В.А. Сясько, К.В. Гоголинский, А.А. Никазов. // Контроль. Диагностика. – 2016. – № 4. С. 44–49.

43. Рудницкий, В.А. Соотношение динамической и статической твердости металлов / В.А. Рудницкий, А.П. Крень, Г.А. Ланцман // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.- тэхн. навук. – 2016. № 4. С. 16–22.

44. Рудницкий, В.А. Оценка пластичности металлических материалов методом динамического индентирования / В.А. Рудницкий, А.П. Крень, Г.А. Ланцман // Литье и металлургия. 2017. №2. С. 81–87.

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

46. Рудницкий, В.А. Оценка модуля упругости металлических материалов методом динамического вдавливания индентора / В.А. Рудницкий, В.В. Дякович // Заводская лаборатория. 1995. № 11. С. 59-61.

47. Справка о развитии аддитивных производственных технологий в Великобритании. Торговое представительство России в Великобритании, 2013. URL http://prom.tularegion.ru/netcat_files/7645/9712/h_8ef5b02124b06204264e9a6abac00b0a.

48. Степанова, К.А. Применение метода динамического индентирования для оценки механических характеристик композиционных материалов / К.А. Степанова, А.В. Ильинский, И.А. Кашапова, Т.А. Протасеня // В мире неразрушающего контроля. – 2016. Т. 19. -№4. – С. 24-27.

49. Сясько, В.А. Разработка эталона твердости по Либу второго разряда / В.А. Сясько, К.В. Гоголинский, А.А. Никазов. // В Мире неразрушающего контроля. – 2017. – № 1(20). С. 16–20.

50. Трубашевский, Д. Цифровые фабрики Индустрии 4.0. Осязаемые прототипы нового технологического уклада / Д. Трубашевский, В. Ежеленко // Электронный доступ: URL: <https://3dtoday.ru/blogs/news3dtoday/digital-factory-industrie-40-tangible-prototypes-of-a-new-technologica> (дата обращения: 20.08.2019).

51. Трубашевский, Д. Эра аддитивного производства наступает / Д. Трубашевский, В. Ежеленко // Сапр и графика – 2015, - 4 (222), - 62-65.

52. Чумаков Д.М. Перспективы использования аддитивных технологий при создании авиационной и ракетно-космической техники // Электронный журнал «Труды МАИ», - 2014, - Выпуск № 78.

53. Юдина, М.А. Индустрия 4.0: перспективы и вызовы для общества. // Государственное управление. Электронный вестник. Выпуск №60. 02.2017 г.

54. [Электронный доступ] URL: www.melytec.ru/upload/iblock/562/Твердомер%20по%20Бринеллю%20Duramin%203000_rus.pdf (дата обращения (17.04.2017)).

55. Alcalá J., Barone A. C., Anglada M. The Influence of Plastic Hardening on Surface Deformation Modes Around Vickers and Spherical Indents // *Acta Materialia*. 2000. v.48. P. 3451–3464.,

56. Dong L., Makradi A., Ahzi S., Remond Y. and Sun. X. Simulation of the Densification of Semicrystalline Polymer Powders during the Selective Laser Sintering Process: Application to Nylon 12. 2008.

57. Gogolinskii K., Syasko V., Umanskii A., Nikazov A., Bobkova T. Mechanical properties measurements with portable hardness testers: advantages, limitations, prospects // *Journal of Physics: Conference Series* & 2019. V. 1384:012012.

58. Hernot X., Bartier O., Bekouche Y., Mauvoisin G., El Abdi R. Influence of Penetration Depth and Mechanical Properties on Contact Radius Determination for Spherical Indentation // *International Journal of Solids and Structures*. 2006. № 43. P. 4136–4153.

59. Hill R., Storakers B., Zdunek A. B. A Theoretical Study of the Brinell Hardness Test // *Proceedings of the Royal Society of London*. 1989. v. A. №423. P. 301–330.

60. ISO 6506-1:2014 Metallic materials - Brinell hardness test - Part 1: Test method.

61. S.H. Kim, B.W. Lee, Y. Choi, and D. Kwon: Quantitative determination of contact depth during spherical indentation of metallic materials: A FEM study. *Mater. Sci. Eng., A* 415, 59 (2006)+ a Frontics Inc.

62. Kohlhöfer W., Penny R. K. Dynamic hardness testing of metals // *Ynt. Y. Pres. Ves. and Piping* 61. — 1995. — P. 65—75.

63. Kucharski S., Mroz Z. Indentation of Plastic Hardening Parameters of Metals from Spherica Indentation Tests // *Materials Science and Engineering A*. 2001. № 318. P. 65–76.

64. Lee H., Lee J.H., Pharr G.M. A Numerical Approach to Spherical Indentation Techniques for Material Property Evaluation // J. Mech. Phys. Solids 2005. № 53. P. 2037–2069.

65. Louvis E. et. Al. Selective laser melting of aluminium components. Journal of Materials Processing Technology. Volume 211, Issue 2, 1 February 2011, Pages 275–284. Department of Engineering, The University of Liverpool, Liverpool L69 3GH, United Kingdom.

66. Martell R. Commission de Methodes d'Essai des Materiaux de Construction. — Paris. — 1895. — 3. — 261 p.

67. Matthews J. R. Indentation Hardness and Hot Pressing // Acta Materialia. 1980. v.28. p. 311–318.

68. Yu.V. Milman, V.A. Goncharuk, L.V. Mordel. Application of the Martell dynamic hardness to the penetration problem.

69. Norbury A., Samuel T. The Recovery and Sinking-in or Piling-up of Material in the Brinell Test, and the Effect of these Factors on the Correlation of the Brinell with Certain other Hardness Tests // Journal of the Iron Steel Institute. 1928. v. 117. P.673–687.

70. W.C.Oliver, G.M.Pharr. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments / Journal Materials Research, Vol.7, NO. 6, June 1992, pp.1564 – 1583.

71. Oliver, W.C. Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: Advances in understanding and refinements to methodology / W.C. Oliver, G.M. Pharr // Journal Materials Research, Vol. 19, No. 1, Jan 2004. pp. 3 – 20.

72. Oliver W. C., Pharr G. M. A new improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and sensing indentation experiments // J. of Mater. Res. — 1992. — 7, No. 6. — P. 1564—1582.

73. I.N. Sneddon, The relation between load and penetration in the axisymmetric Boussinesq problem for a punch of arbitrary profile. *Int. J. Engng. Sci.*, 3 (1965), pp.47-53.

74. Tabor D. *The hardness of metals*. — Oxford: Clarendon Press, 1951.

75. Tabor D. (1951), *The Hardness of Metals*, Oxford University Press, London, GB.

76. Taljat B., Zacharias T., Kosel T. New Analytical Procedure to Determine Stress–strain Curve from Spherical Indentation Data // *International Journal of Solids and Structures*. 1998. v. 35. P. 4411–4426.

77. Taljat B., Pharr G. M. Development of Pile-up During Spherical Indentation of Elastic–plastic Solids // *International Journal of Solids and Structures*. 2004. № 41. P. 3891–3904., Lee H., Lee J.H., Pharr G.M. A Numerical Approach to Spherical indentation Techniques for Material Property Evaluation // *J. Mech. Phys. Solids* 2005. № 53. P. 2037–2069.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Акт о внедрении результатов диссертационной работы

УТВЕРЖДАЮ
Директор ООО «НТЦ «Эталон»

доктор технических наук
профессор О.В. Краснов

2020 г.

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы
Ильинского Александра Вячеславовича

Комиссия в составе:

председателя комиссии – заместителя директора по НИОКР, к.т.н. Быченка В.А.

Членов комиссии:

- руководителя ЦТНК, к.т.н. Беркутова И.В.;
- ведущего научного сотрудника, к.т.н. Сергеева Д.С.,

составила настоящий акт в том, что материалы диссертационной работы Ильинского А.В. на тему: «Совершенствование метода динамического индентирования и средств контроля твердости материалов изделий, выполненных по аддитивным технологиям» были использованы в ООО «НТЦ «Эталон» при создании опытного образца блока неразрушающего контроля качества сложнопрофильных заготовок и изделий, полученных селективным лазерным спеканием в рамках опытно-конструкторской работы «СЛС-НК/Эталон».

При этом были реализованы следующие результаты диссертационной работы:

- алгоритм обработки исходного сигнала магнитоиндукционного преобразователя при контактном ударном взаимодействии;
- результаты экспериментальных исследований определения динамической твердости материалов изделий, выполненных селективным лазерным спеканием.

Использование приведенных результатов диссертационной работы позволило:

- обосновать возможность применения метода динамического индентирования для контроля механических свойств изделий и заготовок, полученных селективным лазерным спеканием;
- разработать специальное программное обеспечение для контроля сложнопрофильных изделий.

Председатель комиссии:

 В.А. Быченко

Члены комиссии:

 И.В. Беркутов

 Д.С. Сергеев