

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

*На правах рукописи*

**СОКОЛОВ Вячеслав Дмитриевич**

**СОЗДАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ УПРОЧНЕНИЯ  
СВОБОДНОДВИЖУЩИМИСЯ ИНДЕНТОРАМИ НА БАЗЕ  
ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ**

Специальность: 2.5.6. Технология машиностроения

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:  
кандидат технических наук, профессор  
Лебедев Валерий Александрович

Ростов-на-Дону – 2022

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|   |    |
|---|----|
| ВВЕДЕНИЕ.....   | 5  |
| Глава 1. ОСНОВЫ И ПУТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ УПРОЧНЯЮЩЕЙ<br>ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ ДИНАМИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ<br>ППВ.....                                | 11 |
| 1.1. Закономерности упрочнения поверхностей деталей динамическими<br>методами ППВ.....  | 11 |
| 1.2. Критерии оценки эффекта упрочнения методами ППВ.....   | 15 |
| 1.3. Энергетические аспекты ППВ динамическими<br>методами.....  | 22 |
| 1.4 Цели и задачи исследований.....   | 28 |
| Глава 2. ИССЛЕДОВАНИЯ УПРОЧНЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИМИ<br>МЕТОДАМИ ППВ С ПОЗИЦИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО<br>ПОДХОДА.....                                    | 31 |
| 2.1. Энергетическая модель упрочнения ДППВ .....  | 31 |
| 2.2. Обоснование метода исследования эффекта упрочнения ДППВ.....   | 37 |
| 2.3. Экспериментальные исследования энергетического состояния<br>упрочнённого поверхностного слоя.....                                      | 38 |
| 2.3.1. Экспериментальный комплекс для проведения исследований.....  | 38 |
| 2.3.2. Технические средства контроля параметров качества пластически<br>деформированных отпечатков. ....                                    | 50 |
| 2.3.3. Методика проведения исследований.....  | 52 |
| 2.4. Результаты экспериментальных исследований энергетического<br>состояния ПС, упрочнённого в процессе ППВ .....                           | 55 |
| Глава 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ<br>ДЕТАЛЕЙ И ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ПРОЦЕССА ППВ НА<br>ОСНОВЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КРИТЕРИЯ..... | 71 |
| 3.1. Энергетический метод оценки продолжительности обработки ППВ.....   | 71 |

|          |  |     |
|----------|--|-----|
| 3.2.     | Энергетический метод оценки качества поверхностного слоя, упрочненного методами ДППВ .....   | 75  |
| 3.2.1.   | Расчет твёрдости поверхностного слоя .....   | 75  |
| 3.2.2.   | Расчет глубины упрочнённого слоя .....   | 76  |
| 3.2.3.   | Расчёт величины остаточных сжимающих напряжений в поверхностном слое.....  | 78  |
| 3.3.     | Экспериментальное обоснование энергетических методов расчета характеристик качества поверхностного слоя (на примере виброударной обработки)..... | 79  |
| 3.3.1.   | Общая методика экспериментальных исследований .....  | 79  |
| 3.3.2.   | Технические средства экспериментальных исследований и режимы обработки.....  | 80  |
| 3.3.3.   | Результаты исследований.....   | 81  |
| Глава 4. | ОЦЕНКА УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ДЕТАЛЕЙ, С ПОЗИЦИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОДХОДА.....   | 93  |
| 4.1.     | Условие разрушения поверхностного слоя .....   | 93  |
| 4.2.     | Исследование влияния ППВ на усталостную долговечность.....   | 95  |
| 4.2.1.   | Прогнозирование влияния ППВ на усталостную (объёмную) долговечность деталей .....  | 95  |
| 4.2.2.   | Экспериментальное обоснование методов оценки усталостной долговечности деталей.....  | 97  |
| 4.2.3.   | Результаты исследований.....   | 100 |
| Глава 5. | РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОПЕРАЦИЙ ОБРАБОТКИ ДИНАМИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ ППВ И ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ.....         | 105 |
| 5.1.     | Методика расчёта технологических режимов ППВ и параметров качества поверхности .....   | 105 |
| 5.2.     | Проектирование операций упрочняющей обработки  |     |

|      |   |     |
|------|---|-----|
|      | методом поверхностного пластического воздействия.....                 | 109 |
| 5.3. | Практическое применение результатов исследования.....                 | 113 |
| 5.4  | Дальнейшее развитие результатов диссертационного<br>исследования..... | 114 |
|      | ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....   | 115 |
|      | СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....  | 117 |
|      | ПРИЛОЖЕНИЕ А. АКТ ВНЕДРЕНИЯ.....                                      | 131 |

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность исследования.** В современных условиях перед машиностроением ставится большой спектр задач, от успешного решения которых зависит качество выпускаемой продукции и повышение эффективности производства. Для решения этих задач особое место занимает физическое упрочнение поверхностным локальным пластическим воздействием (ППВ). Обработку динамическими методами ППВ (ДППВ) включают в технологию изготовления деталей машин для изменения структуры, физико-механических свойств, макро- и микрогеометрии поверхностного слоя и как следствие повышения их эксплуатационных свойств.

В технологической практике режимы ДППВ выбираются на основании или эмпирических зависимостей или экспериментальных исследований для конкретных материалов и условий их упрочняющей обработки. При этом выбранный вариант не всегда является рациональным по технико-экономическим показателям. Однако, при проектировании технологии ДППВ очень важно иметь научно-обоснованную обобщающую методику выбора режимов и условий ППВ, обеспечивающую управление качеством и эксплуатационными свойствами поверхности деталей и приемлемой для различных методов ППВ.

Наибольшую расчетную базу для обоснования эффекта ДППВ на сегодняшний день составляют полуэмпирические зависимости, полученные на базе механического подхода, в основе которого лежат теории и гипотезы пластической деформации, учитывающие технологические факторы деформирования и механики контактного взаимодействия. Все эти зависимости применяют разные критерии, установленные теоретически и экспериментально и приемлемые для конкретных видов и условий ППВ.

В этой связи наиболее перспективным для оценки качества поверхностного слоя упрочненного ДППВ представляется энергетический подход, который в отличие от механического, имеет ряд преимуществ, таких как: универсально характеризует объект и его состояние; обладает свойством аддитивности;

подчиняется фундаментальному закону сохранения энергии; имеет четкий и неизменный физический смысл при любом представлении объекта. Отличительной особенностью этого подхода является то, что для критериальной оценки процессов локального пластического деформирования, микро и субмикроскопических изменений в поверхностном слое и разрушения твердых тел могут быть использованы основные фундаментальные термодинамические характеристики подвергнутого упрочнению материала.

Большой вклад в изучение данного вопроса внесли такие ученые как В.В. Фёдоров, К.А. Осипова, В.С. Иванова, П.А. Павлов, которые показали приемлемость его для оценки состояния поверхностного слоя. Однако для практического применения его не решен целый комплекс вопросов, связанный с разработкой на его основе методик выбора режимов упрочнения ДППВ, определения характеристик качества поверхностного слоя, прогнозирования ресурса изделий на этапе их эксплуатации, что предопределяет актуальность диссертационной работы.

**Степень разработанности темы.** Диссертационная работа основывается на результатах теоретических и экспериментальных исследований ДППВ, изложенных в трудах ученых: М.М. Саверин, И.В. Кудрявцев, М.С. Дрозд, П.А. Чепя, А.В. Киричек, Ю.Р. Копылов, Д.Л. Соловьев, А.П. Бабичев, М.А., В.В. Швец, Тамаркин, В.А., Ю.И. Сидякин, М.М. Матлин, Н.В. Одинцов, В.П. Смоленцев, В.В. Иванов, Б.П. Петросов, Д.Л. Юдин, А.Ю. Албагачиев, А.Г. Суслов. и многих других.

Работа выполнялась в рамках фундаментальных исследований грантов РФФИ №14-38-50686 «Исследование изменения структуры 3-го рода материалов, подвергшихся механическому воздействию, при помощи рентгеноструктурного анализа»; №16-38-00276 «Получение износостойких и коррозионностойких покрытий на основе энергетической модели управления механохимическим синтезом процесса их формирования в условиях ударно-импульсного, виброволнового воздействия свободнодвижущихся инденторов».

**Целью настоящего диссертационного исследования является** разработка методов энергетической оценки качества поверхности и эксплуатационных свойств деталей, упрочненных динамическими методами ППВ, и выработка на этой основе методики проектирования технологий обработки этими методами.

Для достижения поставленной цели в работе решен следующий комплекс **задач:**

1. Определена структура модели изменения энергетического состояния поверхностного слоя в процессе ДППВ.

2. Экспериментально обоснован энергетический критерий упрочнения ДППВ

3. Разработаны, на основе энергетического критерия ППВ, методы определения физико-механических параметров качества поверхностного слоя.

4. Установлено энергетическое условие разрушения поверхностного слоя в процессе циклического нагружения и предложен метод оценки влияния ДППВ на повышение усталостной долговечности деталей.

5. Получена зависимость для расчёта продолжительности обработки деталей методами ДППВ.

6. Разработаны методика и технологические рекомендации по проектированию технологии упрочнения ДППВ.

**Объект исследований** – технологии упрочняющей обработки деталей ППВ.

**Предмет исследований** – энергетическая оценка качества и эксплуатационных свойств поверхностного слоя, модифицированного в процессе ППВ динамическими методами.

**Научные результаты, выносимые на защиту:**

1. Модельные представления и результаты экспериментальных исследований по обоснованию энергетического критерия упрочнения поверхностного слоя ДППВ и его разрушения в процессе эксплуатации.

2. Расчетные зависимости по определения физико-механических характеристик качества поверхностного слоя, продолжительности процесса ДППВ, прогнозирования повышения усталостной долговечности деталей при их циклическом нагружении.

3.Методика и рекомендации по проектированию технологии ППВ динамическими методами.

**Научная новизна проведённых исследований** заключается: в обосновании энергетического критерия упрочнения поверхностного слоя ДППВ и его разрушения в процессе эксплуатации; в разработке на его основе расчетных зависимостей по определению физико-механических характеристик качества поверхности, продолжительности процесса обработки, прогнозирования усталостной долговечности упрочнённых деталей в процессе циклического нагружения.

**Теоретическая значимость работы** заключается в раскрытии и аналитическом описании механизма изменения состояния поверхностного слоя деталей в процессе ДППВ и эксплуатации с позиций энергетического подхода.

**Практическая значимость работы** заключается в разработке методики расчёта режимов обработки и параметров качества поверхности, а также технологических рекомендаций по проектированию технологии ППВ динамическими методами.

**Методологической базой исследований** являются основы технологии машиностроения, термодинамики, теории прочности и разрушения твердых тел, исследования в области упрочняющих технологий, физики металлов и металловедении.

#### **Соответствие диссертации паспорту научной специальности.**

Содержание диссертационного исследования соответствует специальности 2.5.6. Технология машиностроения: 2. Технологические процессы, операции, установки, позиции, технологические переходы и рабочие хода, обеспечивающие повышение качества изделий; 7. Технологическое обеспечение и повышение качества поверхностного слоя, точности и долговечности деталей машин; 3. Математическое моделирование технологических процессов и методов изготовления деталей и сборки изделий машиностроения.

**Апробация работы.** Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на конференциях: международной научно-технической конференции

«Фундаментальные проблемы техники и технологии», Орёл, 2012г.; всероссийской с международным участием научно-технической конференции «Жизненный цикл конструкционных материалов», г. Иркутск, 2012 г., 2014 г., 2016 г.; международной научно-технической конференции «Научоёмкие технологии в машиностроении и авиадвигателестроении», г. Рыбинск, 2012 г.; международной научно-технической конференции «Перспективные направления развития технологии машиностроения и металлообработки», г. Ростов-на-Дону, 2013 г.; международной научно-технической конференции «Научоёмкие комбинированные и виброволновые технологии обработки материалов», г. Ростов-на-Дону, 2013 г.; международной научно-технической конференции «Машиностроение – основа технологического развития России (ТМ2013)», г. Курск, 2013 г.; международном научном симпозиуме технологов-машиностроителей и механиков «Волновые и виброволновые технологии в машиностроении, металлообработке и других отраслях», г. Ростов-на-Дону, 2014 г.; международном научном симпозиуме технологов-машиностроителей «Интегрированные, виброволновые технологии в машиностроении, металлообработке и других отраслях», г. Ростов-на-Дону, 2015 г.; международной научно-технической конференции «Перспективные направления развития отделочно-упрочняющей обработки и виброволновых технологий», г. Ростов-на-Дону, 2017 г., 2019-2020 гг. ; международной научно-технической конференции «Виброволновые процессы в технологии обработки высокотехнологичных деталей», г. Ростов-на-Дону, 2017 г.; международной научно-технической конференции «Фундаментальные основы физики, химии и механики наукоёмких технологических систем формообразования и сборки изделий», г. Ростов-на-Дону, 2019-2021 гг.

#### **Публикации результатов работы.**

По результатам диссертационного исследования опубликовано 22 научных работы, из них 10 статей в журналах, входящих в перечень ВАК РФ, 1 статья, индексируемая в системе «Scopus».

## **Структура и объем работы**

Диссертационная работа состоит из: введения, пять глав, заключения и библиографического списка, включающего 152 источника. Работа изложена на 131 странице, содержит 50 рисунков, 22 таблицы, 1 приложение.

# ГЛАВА 1. ОСНОВЫ И ПУТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ ДИНАМИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ ППВ

## 1.1. Закономерности упрочнения поверхностей деталей динамическими методами ППВ

Наибольший вклад в разработку физико-технологических основ обработки ППВ динамическими методами внесли отечественные учёные А.П. Бабичев, М.А. Балтер, Г.С. Батуев, И.А. Биргер, М.С. Дрозд, И.В. Кудрявцев, М.М. Саверин, М.Я. Шашин, Э.В. Рыжов, В.В. Петросов, Д.Д. Папшев, Б.П. Рыковский, Н.Д. Генкин и другие, а также зарубежные учёные R.M. Brach, A. Chatterjee, A. Ruina, T.L. Elliott, V. Przybylski.

Результаты исследований в области ДППВ, представленные в трудах вышеназванных и других учёных, позволяют констатировать следующее.

Разработанное на сегодняшний день в отечественной и зарубежной практике большое количество только динамических методов ППВ, представленных на рис.1.1, свидетельствует об их востребованности в технологии изготовления деталей машин.

Упрочняющий эффект при обработке методами ДППВ обеспечивается в результате ударно-импульсного, полностью покрывающего, воздействия различных инденторов на обрабатываемую поверхность. При этом на поверхности формируется качественно новый микрорельеф, в поверхностном слое появляются сжимающие остаточные напряжения, а его структура приобретает моногенный текстурированный характер. Именно эти изменения, происходящие в поверхностном слое в процессе ППВ, определяют целевое технологическое назначение методов ДППВ, направленное на повышение эксплуатационного ресурса деталей машин.



Рис. 1.1. Динамические методы ППВ [75]

В таблице 1.1 приведены особенности и основные факторы, от которых зависят энергосиловые и технологические возможности методов ДПТВ.

Несмотря на конструктивные различия технологических систем, разработанных для реализации методов ДПТВ (таблица 1.1), следует подчеркнуть одно очень существенное обстоятельство, которое их объединяет и позволяет рассматривать их физико-технологическую сущность с единых методологических позиций – это ударно-импульсный механизм деформирования поверхности [35].

В работах [12; 13; 16; 22; 25; 37; 83; 84] установлено, что процесс ДПТВ сопровождается сложными микро и субструктурными изменениями, к повышению прочности поверхностных слоёв, увеличению их пределов текучести, твердости, хрупкости и снижению пластичности [21; 24; 28; 44; 83; 84; 86; 89]. На рис. 1.2–1.3 проиллюстрирован характерный вид кривых изменения в упрочнённом поверхностном слое осевых остаточных напряжений и микротвёрдости.

Таблица 1.1 Факторы, определяющие энергетические возможности обрабатывающей среды методов ДППВ

| Метод ППД                                 | Аббревиатура метода | Факторы, определяющие скорость частиц   |
|---|---------------------|---|
| Дробеструйная обработка                   | ДО                  | Диаметр сопла, давление жидкости (воздуха), объемный расход жидкости (воздуха)  |
| Гидродробеструйная обработка              | ГДО                 |   |
| Виброударная обработка                    | ВиУО                | Амплитудно -частотные колебания рабочей камеры  |
| Центробежно-ротационная обработка         | ЦРО                 | Радиус вращающегося ротора и его частота вращения   |
| Упрочнение шарико-стержневым уплотнителем | ШСУ                 | Амплитуда и частота колебаний инденторов, их длина, количество, радиус закругления рабочей части (торца) индентора                      |
| Упрочнение механическими щётками          | УМЩ                 | Число оборотов шпинделя, наружный диаметр щётки, длина ворса и его жесткость, натяг   |
| Чеканка                                   | ЧЕК                 | Энергия удара, шаг чеканки, т. е. расстояние между соседними центрами приложения ударной нагрузки по подаче, радиус ударной части бойка |

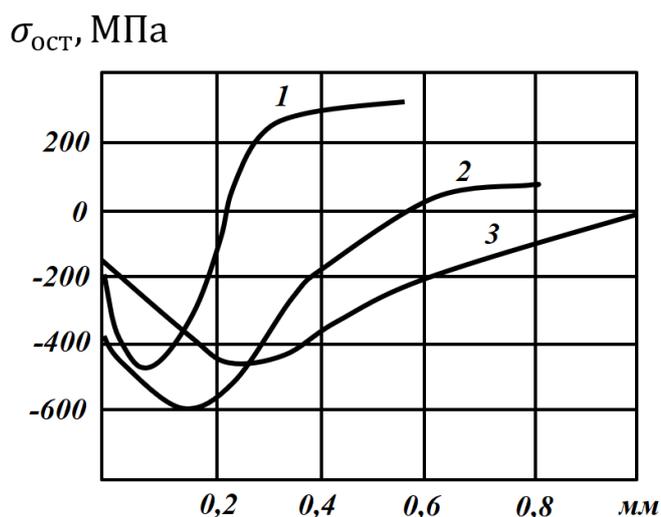


Рис.1.2. Изменения осевых остаточных напряжений в упрочненном поверхностном слое образцов из стали 18Х2Н4ВА после:

- 1 – дробеструйной обработки; 2 – центробежно-шариковой обработки;  
3 – раскатывания [по данным 28]

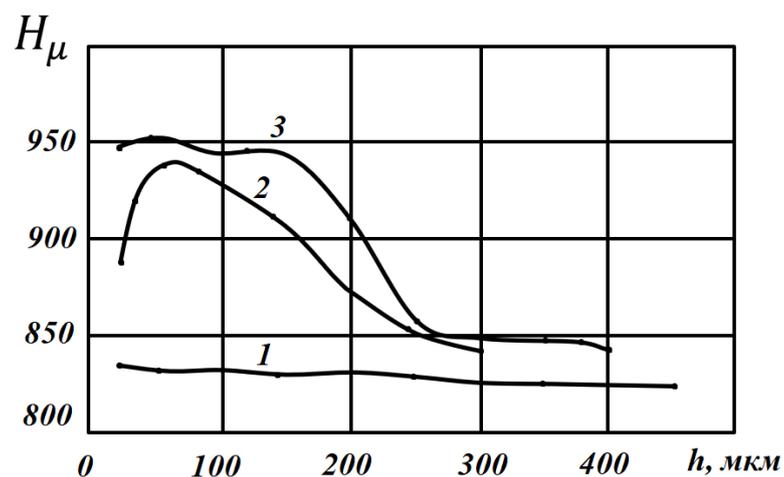


Рис. 1.3. Изменение микротвердости в упрочненном поверхностном слое зубчатых колес из стали 20Х3ВМФ в зависимости от продолжительности обработки стальными инденторами: 1 – исходная; 2 –  $T = 180$  мин; 3 –  $T = 300$  мин [по данным 28]

В работах [16; 25; 29; 32] также экспериментально доказано, что интенсивность изменения остаточных сжимающих напряжений и прирост микротвердости в пластически деформированном поверхностном слое зависит от скорости инденторов обрабатывающей среды и продолжительности обработки. Увеличение скорости нагружения до 100 м/с повышает предел текучести армко железа в 3,4 раза, стали 45 в 3 раза, Ст3 – в 2,8 раза, а временное сопротивление для углеродистых закаленных сталей возрастает на 43 %, для железа армко – на 55 %. Завышение энергосиловых параметров силового ударно-импульсного взаимодействия на поверхность обработки приводит к разрушению поверхности, появлению микротрещин, образованию частичек отслаивающегося металла [35].

Установлено, что процесс ППВ динамическими методами сопровождается тепловым эффектом [75], Использование СОЖ снижает кратно всю температуру при деформировании поверхности [98].

Проведённый краткий анализ и выявленные при этом свойственные процессу ДППВ закономерности позволяют с единых (несмотря на внешние различия динамических методов) методологических и физических позиций подойти к решению проблемы, связанной с разработкой наиболее обобщенной методики

проектирования технологии ДППВ динамическими методами.

## 1.2. Критерии оценки эффекта упрочнения методами ППВ

На протяжении развития науки о ППВ для разработки аналитических моделей, описывающих механизм и явления упрочнения различных по структуре материалов, и обоснования эффективности на их основе методов упрочнения ППВ, сформировались следующие основные подходы: механический и энергомеханический.

Так, применяя *механический* подход, основанный на описании эффекта упрочнения при помощи эмпирических зависимостей, устанавливаемых путём проведения лабораторных и натурных испытаний, И.В. Кудрявцевым, М.М. Савериным [66; 67; 113] предложен ряд зависимостей для оценки эффективности процессов ДППВ. Наибольшее применение из них получила зависимость для степени деформации в условиях многократного соударения сферических ударников с обрабатываемой поверхностью в виде:

$$\frac{d}{D} = K_y \left( \frac{2 \rho n_{дин} + 2}{3 g H_{дин}} V^2 \right)^{\frac{1}{n_{дин} + 2}},$$

где  $d$  – диаметр отпечатка, который получается при пластическом деформировании под действием индентора, м;  $D$  – диаметр индентора, мм;  $n_{дин}$ ,  $H_{дин}$  – динамическая твердость и коэффициент твердости, МПа;  $V$  – скорость соударения индентора с обрабатываемой поверхностью индентора, м/с;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $K_y = 1 + B_y (n_y - 1)^{m_y}$ ,  $n_y$ ,  $B_y$ ,  $m_y$  – коэффициенты, характеризующие механические свойства обрабатываемого материала.

Применение в этой зависимости коэффициентов, характеризующих механические свойства обрабатываемого материала сдерживает её использование для сравнительного анализа методов упрочнения реальных деталей из различных материалов и оценки физико-механических характеристик поверхностного слоя в процессе ДППВ.

Наибольшую базу для определения расчётных оценок эффекта упрочнения ДППВ динамическими методами на сегодняшний день составляют полуэмпирические зависимости, полученные на основе механического подхода к качественному и количественному анализу механизма процесса ДППВ. В основе этого подхода лежит универсальная теория пластичности материалов, учитывающая технологические факторы деформирования и механику контактного взаимодействия. При этом поверхностный слой рассматривается как сплошное деформируемое твердое тело. Рассмотрим наиболее известные.

Принимая в качестве критерия ДППВ остаточные сжимающие напряжения, формируемые в поверхностном слое Б.П. Рыковским [112] предложены условия:

$$\sigma''_{XX} = -E_{II} \varepsilon_{XX}^{OCT}, \text{ при } \varepsilon_S \geq \varepsilon_{XX} > 0;$$

$$\sigma''_{XX} = -K_{II} (\varepsilon_{XX}^{OCT})^n, \text{ при } \varepsilon_{XX} > \varepsilon_S,$$

где  $\varepsilon_S$  – степень деформации, соответствующая участку перехода степенной аппроксимации кривой упрочнения в линейную;  $\sigma''_{XX}$  – напряжение, соответствующее остаточной деформации  $\varepsilon_{XX}^{OCT}$ ;  $E_{II} = E(1-M)$  – приведенный модуль упругости;  $M$  – секущий модуль упругости материала, соответствующий определяемой остаточной деформации:

$$K_{II} = 2^n k \quad k = \sigma_b / \varepsilon_b^n \quad n = (\lg \sigma_b - \lg \sigma_{0,2}) / (\lg \varepsilon_b - \lg \varepsilon_{0,2});$$

$k, n$  – пластические константы.

На основе этих зависимостей ими разработана методика расчета технологических режимов ДППВ и физико-механических характеристик упрочнённого поверхностного слоя с учетом начального напряженного состояния детали, при условии обеспечения равномерного покрытия всей поверхности детали пластическими отпечатками. Однако для практического применения предложенных зависимостей необходимо установление пластических констант. Кроме того, не учтенное автором работы [112] в расчетах влияние температурного

фактора на величину остаточных напряжений входит в противоречие с исследованиями, проводимыми в этом направлении.

П.А. Чепач считает, что параметры области деформации при СППВ [137; 138] оказывают влияние геометрические размеры деформирующего инструмента. Используя основные положения теории упругости и пластичности, он представляет локальный, пластически деформируемый объем поверхностного слоя при внедрении сферического индентора в металл в виде зон текучести, проиллюстрированных на рис. 1.4. При этом в качестве критерия разрушения поверхности металла, модифицируемой в процессе СППВ, он предлагает принимать исчерпание ресурса пластичности, оцениваемое обобщенным критерием В.Л. Колмогорова [18; 54]:

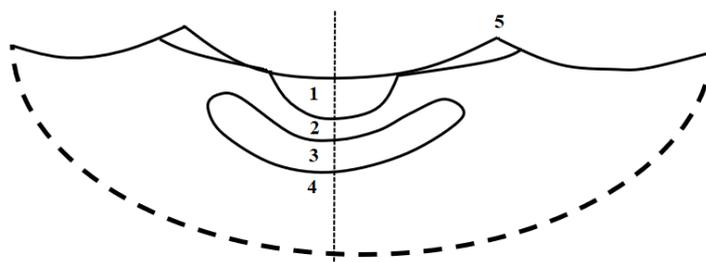


Рис. 1.4. Зоны текучести при внедрении сферического индентора:

- 1 – зона полного торможения; 2 – зона частичного торможения;  
 3 – зона подповерхностной текучести; 4 – внутренняя полость металла;  
 5 – зона поверхностной текучести

$$\psi = \int_0^t B(\tau) \cdot \frac{H(\tau)}{L_p[k(\tau)]} \cdot d\tau \leq 1,$$

где  $\psi$  - запас пластичности за время деформации;  $B(\tau)$  - коэффициент, определяющий историю деформации (с);  $H(\tau)$  - интенсивность деформации сдвига (с);  $L_p[k(\tau)]$  - предельная деформация сдвига  $\tau$  - продолжительность деформации, с;  $\kappa(\tau) = \frac{\sigma}{T}$  - коэффициент напряженного состояния;  $\sigma$  - среднее напряжение в точке контакта, Па;  $T$  - интенсивность касательных напряжений, Па.

Предложенная им на основе этого критерия методика назначения технологических режимов упрочнения и прогнозирования усталостной прочности деталей, как показали исследования [35], применима только для квазистатических методов упрочнения ПШВ.

В.М. Смелянский [116], предлагает упрочнение металла поверхностного слоя определять путем выявления области пластического течения и устанавливать в этой области траектории движения частиц металла за весь цикл деформации сдвига (рис. 1.5.), используя для этого не кривую  $\sigma(\varepsilon)$  растяжения-сжатия, а кривую предельной пластичности  $\Gamma_p(\Pi)$ , полученную на основе гипотезы «единой кривой» которая устанавливает в теории пластичности связь между инвариантными характеристиками напряженных и деформированных состояний.

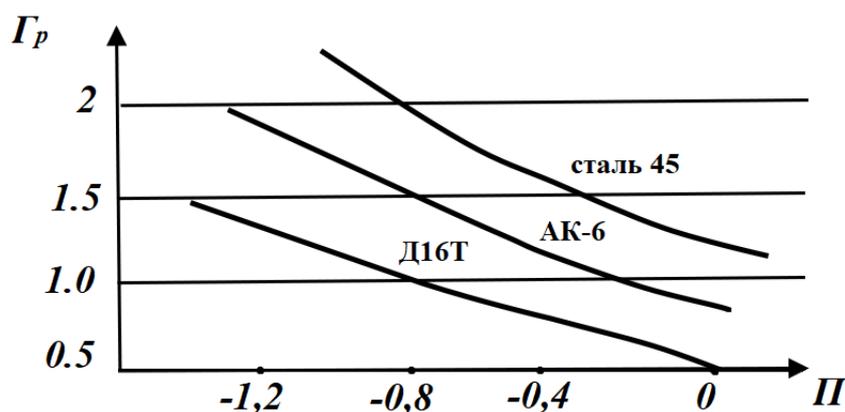


Рис.1.5. Кривые предельной пластичности

В качестве критерия разрушения им принят ресурс пластичности  $\psi$ , который учитывает эффект залечивания дефектов металла при перемене знака деформации, наблюдаемой непосредственно на обрабатываемой поверхности, и предполагает, что критерий разрушения имеет вид:

$$\psi_p = \sum_{i=1}^L \psi_i - \sum_{i=1}^{L-1} \psi_i \left( \frac{1 - \psi_i^{a-1}}{1 - \psi_i^a} \right) = 1,$$

где  $L$  – число этапов деформирования (для обкатывания и выглаживания  $L = 3$ ),  $a$  – коэффициент, учитывающий способность металла к залечиванию

образовавшихся в процессе деформации дефектов при перемене знака деформации (величина, обратная коэффициенту Менсона-Коффина).

Как свидетельствуют исследования автора [116], этот критерий, базирующийся на теории объемного деформирования, достаточно объективно, с очень высокой степенью корреляции, оценивает такие процессы СППВ, как обкатывание, выглаживание. Однако попытки применить его для оценки эффекта упрочнения ДППВ не привели к положительным результатам из-за нестабильности степени и знака деформации поверхностного слоя.

Используя энергомеханический подход, В.В. Петросов на основе анализа энергетического баланса процесса гидродробеструйного упрочнения [98]:

$$\mathcal{E}_y = \mathcal{E}_{пл.д.} + \mathcal{E}_{тр} + \mathcal{E}_{ж} + \mathcal{E}_в + \mathcal{E}_{упр}, \quad (1.1)$$

где  $\mathcal{E}_y$  – энергия удара единичного сферического индентора массой  $m$ ;  $\mathcal{E}_{пл.д.}$  – энергия, затрачиваемая на пластическую деформацию,  $\mathcal{E}_{тр}$  – энергия, затрачиваемая на трения;  $\mathcal{E}_{ж}$  – энергия, затрачиваемая на преодоление жидкостной пленки;  $\mathcal{E}_в$  – волновая энергия;  $\mathcal{E}_{упр}$  – энергия упругого восстановления, предложил в качестве критерия упрочнения величину работы, затрачиваемой на деформирование поверхности, рассчитываемой по формуле:

$$A = 262 \cdot 10^{-6} \cdot n_{\partial}^3 \omega_A \Gamma_n \varepsilon_{\partial}^4 D^3, \quad (1.2)$$

где  $n_{\partial}$  – динамический коэффициент;  $\omega_A$  – коэффициент условий обработки;  $\Gamma_n$  – величина минимальных касательных напряжений, необходимых для движения дислокаций, Па;  $\varepsilon_{\partial} = \frac{\gamma}{D}$  – интенсивность деформации;  $D$  – диаметр индентора, мм.

Существенным недостатком, предложенной автором [98] формулы является вычисление величины  $n_{\partial}^3 \omega_A$  на основе экспериментально установленных значений  $\mathcal{E}_y, \gamma, \varepsilon_{\partial}$  в зависимости от выбранных режимов.

Для оценки сопоставимости режимов и способов упрочнения ДППВ, по мнению М.А. Рыжова [28] и М.Я Шашина [139], целесообразно использовать обобщенные критерии, являющиеся комплексной характеристикой структуры и свойств поверхностного слоя после упрочнения в виде удельной кинетической энергии, сообщаемой дробью единице поверхности в единицу времени:

$$E_{,в} = \frac{Q_{\partial} V_{\partial}^2}{2gS_n}, \text{ кг/с}^2,$$

где  $Q_{\partial}$  – весовой расход дроби в единицу времени, кг\*м/с<sup>2</sup>;  $V_{\partial}$  – скорость дроби, м/с;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $S$  – площадь поверхности, упрочняемой потоком дроби, м<sup>2</sup>.

В работе [75] предложена расчётная зависимость, позволяющая обосновать минимально необходимую скорость обработки для обработки ДППВ:

$$V_{\min} = \frac{R_z D \pi^{\frac{\nu}{\nu+1}} C \sigma_T \chi}{K_M} \left( \frac{0.477}{b} \right)^{\frac{1}{\nu}} \cdot \frac{(\nu-1)^{\frac{\nu-1}{2\nu}}}{2\nu},$$

где  $R_z$  – высота шероховатости поверхности;  $C$  – коэффициент стеснения (для сферы  $C = 2,8-3$ );  $\sigma_T$  – предел текучести;  $K_M$  – коэффициент податливости материала;  $b, \nu$  – параметры опорной кривой микропрофиля;  $D$  – диаметр инденторов, применяемых для обработки;  $\chi$  – коэффициент динамичности.

По результатам исследования Ю.И. Сидякина [115] оптимальным режимом упрочняющей обработки СППВ, является такой, который обеспечивает максимальное приращение предела выносливости детали  $\Delta\sigma_{-1}$  по сравнению с его исходным значением. В качестве такого критерия им предложена интенсивность пластической деформации  $\varepsilon_{i,o}$  поверхностного слоя. Учитывая, что главная часть деформационного упрочнения материала исчерпывается на стадии равномерной деформации, т.е. при  $\varepsilon_{i,o} < \varepsilon_p$ , а при  $\varepsilon_{i,o} > \varepsilon_p$  наблюдается интенсивный рост количества и размеров микротрещин (первые из которых зарождаются на самой ранней стадии пластического деформирования), приходим к заключению:

эффективность ППВ должна быть максимальной, если интенсивность пластической деформации  $\varepsilon_{i,0}$  упрочненного поверхностного слоя детали будет близка по значению к предельной равномерной деформации материала, т.е. при

$$\varepsilon_{i,0} = \varepsilon_{i,0}^* \approx \varepsilon_p .$$

Проведённый анализ научно-технической литературы показал, что для обоснования режимов упрочнения ДППВ чаще всего используются эмпирические зависимости, установленные или на основе механического подхода к анализу механизма процесса ДППВ, или результатов экспериментальных исследований, или полученных при испытаниях образцов, подвергнутых ДППВ при разных режимах. В таблице 1.2 приведены критерии эффективности обработки ДППВ, подкреплённые результатами экспериментальных и теоретических исследований и апробированные в технологической практике.

Наличие большого количества критериев свидетельствует о том, что данный вопрос на нынешнем этапе не получил своего должного разрешения.

Многофакторность процесса ДППВ, связанная с одновременным протеканием эффектов пластической деформации, микро и субструктурных изменений, и разрушения твердых тел, отсутствие научно - обоснованного обобщённого критерия оценки эффекта упрочнения является сдерживающим фактором выбора метода ДППВ и как следствие проектирования рациональной технологии его реализации для увеличения рабочих характеристик деталей. В этой связи многие исследователи все чаще стали обращаться к энергетическим параметрам оценки состояния твердых тел в процессе их модификации ППВ, в качестве которых выступают основные термодинамические характеристики обрабатываемого материала.

Таблица 1.2 Критерии эффективности обработки методами ППВ

| Вид критерия                                  | Связь критерия с механическими свойствами материалов и условиями обработки  | Автор                           | Методы ППД                  |
|---|---|---------------------------------|-----------------------------|
| Степень деформации                            | $\frac{d}{D} = K_y \left( \frac{2\rho n_{\text{дин}} + 2}{3g H_{\text{дин}}} V^2 \right)^{\frac{1}{n_{\text{дин}}+2}}$  | Кудрявцев И.В.,<br>Саверин М.М. | Динамические                |
| Степень упрочнения                            | $\sigma''_{XX} = -E_{\text{п}} \varepsilon_{XX}^{\text{ОСТ}}$ при $\varepsilon_s \geq \varepsilon_{XX} > 0$<br>$\sigma''_{XX} = -E_{\text{п}} (\varepsilon_{XX}^{\text{ОСТ}})^n$ при $\varepsilon_{XX} > \varepsilon_s$ | Рыковский Б.М.                  | Динамические                |
| Исчерпания ресурса пластичности               | $\psi = \int_0^t B(\tau) \cdot \frac{H(\tau)}{L_p[k(\tau)]} d\tau \leq 1$   | Колмогоров В.Л.                 | Статические                 |
| Исчерпания ресурса пластичности               | $M = \frac{h_b}{h} \cdot \frac{2r_p + D_p}{r_p D_p}$  | Чепя П.А.                       | Статические                 |
| Интенсивность деформации                      | $\varepsilon_{i,0} = \varepsilon_{i,0}^* \approx \varepsilon_p$   | Сидякин Ю.И.                    | Динамические<br>Статические |
| Критическое значение удельной работы дробилки | $E_{\text{уд}} = \frac{q_{\partial} V_{\partial}^2}{2g S_n}$  | Генкин М.Д.                     | Динамические                |
| Критическое значение                          | $M = \frac{P}{2g} V_{\partial}^2$   | Шашин М.Я.                      | Динамические                |

### 1.3. Энергетические аспекты ППВ динамическими методами

Анализ исследований в области ППВ динамическими методами, проведённый в разделе 1.1, свидетельствует о том, что процесс ППВ, независимо от физико-химической природы материала, его структуры, а также условий нагружения, является необратимым процессом, характеризуемый феноменологичностью и статистичностью протекания процесса [75].

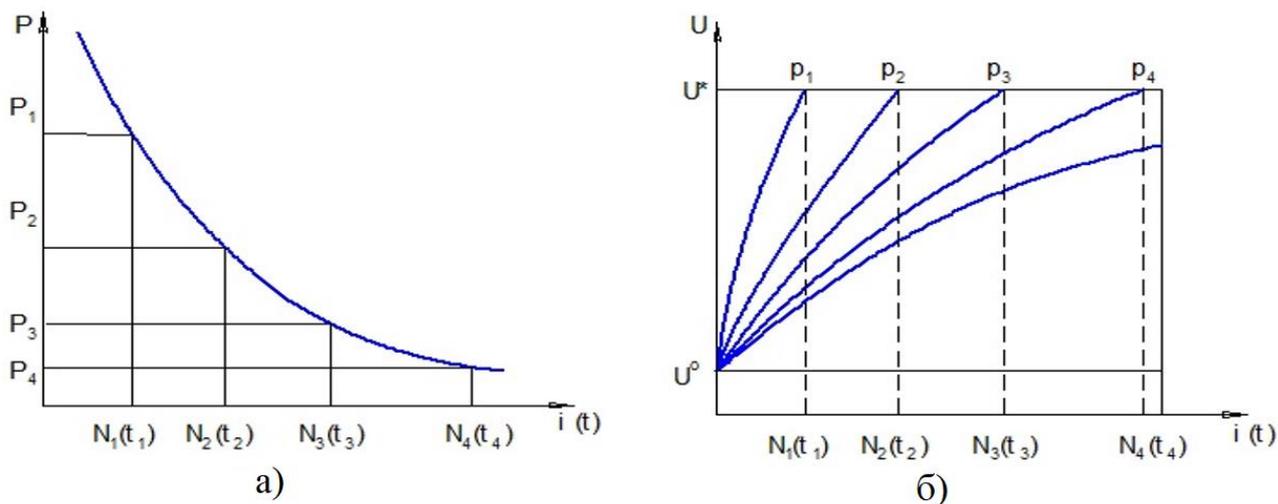


Рис.1.6. Закономерности кинетики процесса ППВ

На рис. 1.6 проиллюстрированы кинетические кривые процесса ППВ, показывающие, что по мере деформирования элемента поверхностного слоя силой  $P$  ( $p_1, p_2, p_3$ ) его микро и субструктурные изменения  $U$  увеличиваются до достижения ими критической величины  $U^*$ , зависящей от свойств обрабатываемого материала (Рис. 1.6б). Изменение величины силового воздействия  $P$  ( $p_1, p_2, p_3$ ) (рис.1.6а) на элемент поверхности приводит к изменению количества, циклов ударно- силового воздействия  $N(t)$ , обеспечивающих доведение в нем микро и субструктурных преобразований до критической величины.

Микро и субструктурные преобразования, происходящие в локальном объёме поверхности при ДППВ приводят к изменению его энергетического состояния. На рис. 1.7 показаны основные энергетические факторы, обеспечивающие изменение энергетического состояния пластически деформируемого локального микрообъема поверхности.

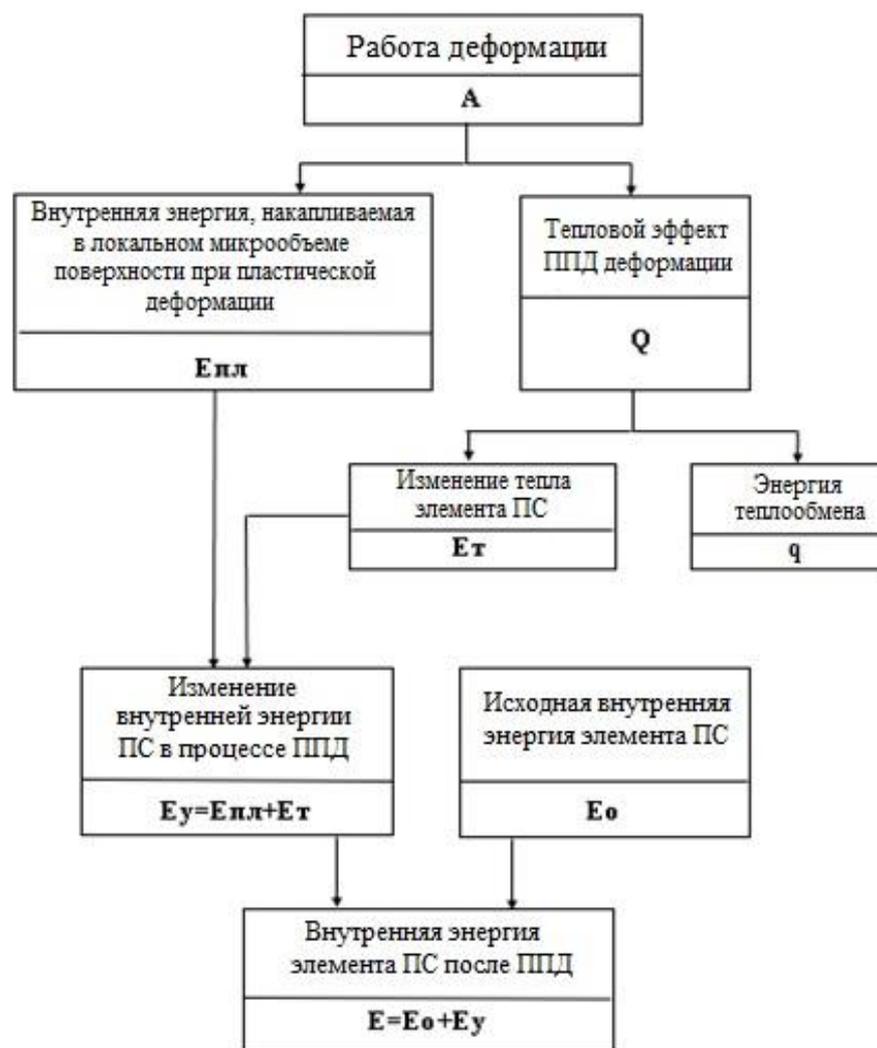


Рис. 1.7. Механизм изменения энергетического состояния локального объём поверхности при ДППВ [95]

В соответствии с представленными на Рис.1.7 основными энергетическими факторами, определяющими протекание в локальном микрообъеме поверхности микро и субструктурных преобразований и как следствие изменение его внутренней энергии, являются пластическая деформация  $E_{пл}$  и тепловой эффект ППВ  $Q$ , на которые затрачивается работа силового воздействия инденторов, реализующих процесс ДППВ [70; 98; 132]:

$$A = E_{пл} + Q, \text{ Дж.} \quad (1.3)$$

Согласно [95] на повышение внутренней энергии локального микрообъема расходуется только часть тепловой энергии  $E_T$ . Таким образом, в соответствии с Рис 1.7 можно записать:

$$E_y = E_{пл} + E_T. \quad (1.4)$$

В общем виде условие, определяющее энергетическое состояние деформируемого в процессе ДППВ элемента материала ПС, будет иметь вид:

$$E = E_0 + E_{пл} + E_T, \text{ Дж}, \quad (1.5)$$

где  $E_0$  – энергия, запасенная в деформируемом элементе поверхностного слоя на предшествующих ДППВ операциях механической обработки.

На основе вышеизложенных положений в работах [35; 75; 95] разработана структурно-энергетическая интерпретация процесса, и сформулированы энергетические аспекты упрочнения твердых тел методами ДППВ:

- накапливаемая в деформируемом локальном микрообъеме ПС внутренняя энергия  $E$  является наиболее ответственной за его упрочнение, что согласуется с исследованиями, представленными на рис.1.8 и 1.9;
- за параметр микро и субструктурных изменений ПС принимается величина энергии  $E$ , определяющая энергетическое состояние элемента ПС, деформированного на всех этапах технологического силового воздействия на него;
- за критерий упрочнения элемента пластически деформируемого ПС принимается величина внутренней энергии  $E_{пр}$ , при которой локальные микрообъемы ПС сохраняют (без разрушения) прочностные свойства.

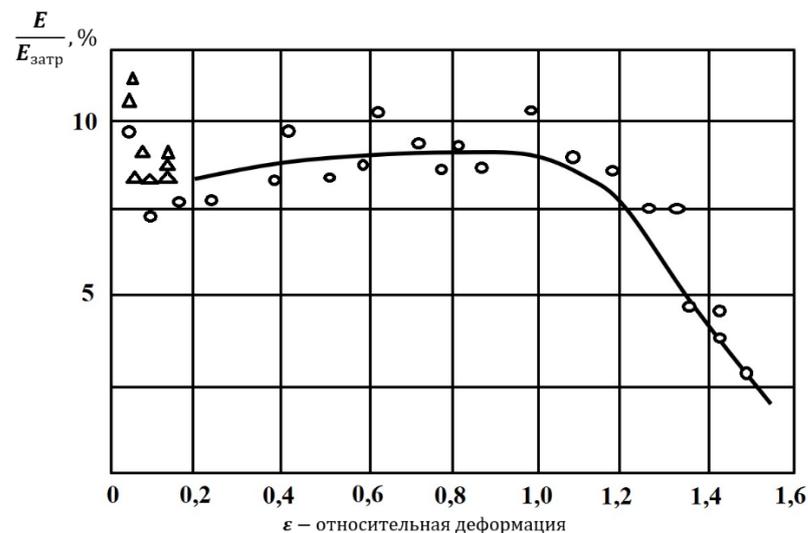


Рис.1.8. Зависимость относительной величины внутренней энергии, локального микрообъема поверхности, от степени его деформации  $\epsilon$  [35]

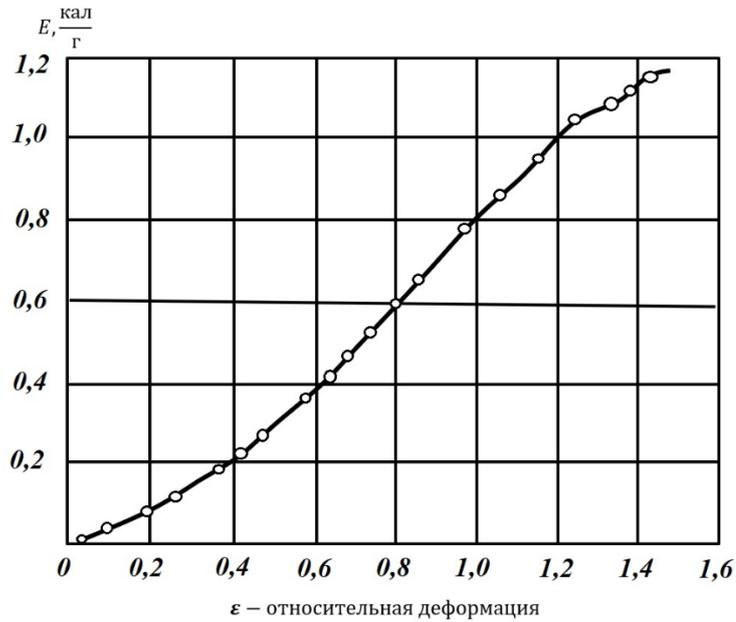


Рис.1.9. Изменение количества поглощенной энергии от степени деформации [95]

С учётом изложенных энергетических аспектов энергетическое условие упрочнения элемента ПС в процессе ДППВ может быть представлено в виде:

$$E = E_0 + E_y, \quad E \leq E_{\text{пр}}, \text{ Дж}, \quad (1.6)$$

$$E_{\text{пр}} = \text{const},$$

где  $E = E_0 + E_y$  – изменение внутренней энергии в элементе ПС, зависящее от числа циклов его силового нагружения  $i$ .

В работах [39; 42; 70; 98; 99; 132; 133] сделаны попытки оценить величину предельной энергии  $E_{\text{пр}}$ , затрачиваемой на деформирование твердого тела с термодинамическими характеристиками вещества (теплотой сублимации, теплотой (энтальпией) материала в твердом или жидком состояниях при температуре плавления, скрытой теплотой плавления). Таким образом, основываясь на аналогии между процессами поглощения энергии кристаллической решеткой при механическом нагружении и при нагреве в работах [42; 75; 98], предлагается энергию, затрачиваемую на формирование твердого тела, оценить величиной равной изменению теплосодержания металла при нагреве от заданной температуры  $T_{\text{и}}$  до температуры плавления  $T_{\text{с}}$ :

$$F = \int_{T_{\text{и}}}^{T_{\text{с}}} C_p dT, \quad (1.7)$$

где  $C_p$  – удельная теплоемкость, Дж/моль×К.

Анализируя данную аналогию в выше указанных работах, отмечается, что из-за анизотропности и несовершенства кристаллической решетки металлов, она приемлема только на уровне локальных объемов металла.

Для подтверждения приемлемости предложенной аналогии для оценки эффекта упрочнения при обработке ДППВ в работе [98] приведены результаты исследований, представленные на Рис.1.10., которые показывают, что при продолжительности обработки, обеспечивающей энергетическое состояние поверхностного слоя, равное термодинамической константе  $\Delta H$ , достигается максимальный прирост долговечности образцов.

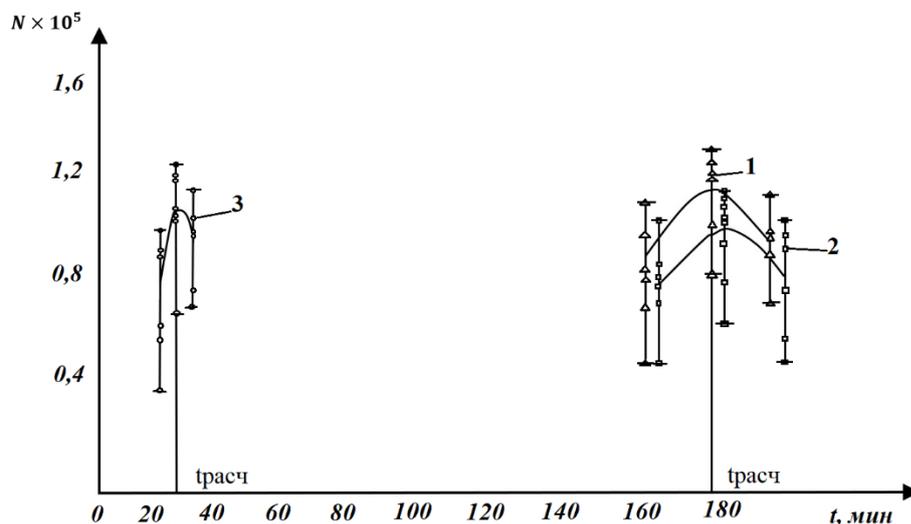


Рис. 1.10. Влияние энергетического состояния поверхностного слоя, модифицированного ППВ, на долговечность образцов:  
 1 – Сталь 40Х,  $\sigma_a = 200$  МПа; 2 – Сталь 20,  $\sigma_a = 200$  МПа;  
 3 – АК6Т - 1,  $\sigma_a = 180$  МПа

На основании этих исследований автором [98] предложена расчётная зависимость, позволяющая осуществлять выбор наиболее рациональных, с точки зрения производительности и технологических возможностей технологической системы, режимов ДППВ в виде:

$$E_{уд} \cdot \tau^*(i) = \frac{0,5h_s^*(\Delta H^* - 2E_o)}{0,85(1 - K_W^*) \left\{ 1 - \left[ 1 - K_W^* \left[ 1 - (3T/T_{TS})^{0,25} \right] \right] \right\}} .$$

В заключение следует отметить, что предложенный в ряде работ энергетический подход, основанный на применении термодинамических констант для оценки эффекта ДППВ, получил лишь опосредованное экспериментальное подтверждение, а следовательно, не может в полной мере считаться научно обоснованным для его практического применения. Именно это обстоятельство предопределило цель и задачи настоящего диссертационного исследования.

#### **1.4. Цели и задачи исследований.**

Анализ работ, посвящённых исследованию закономерностей и модельных критериев оценки эффекта упрочняющей обработки ДППВ, позволяет констатировать следующее.

По своей физической сущности и характеру силового воздействия на материал методы ДППВ являются идентичными и представляют собой непрерывный процесс пластической деформации, микро и субструктурных изменений, в результате которых на детали формируется поверхностный слой с повышенными физико-механическими характеристиками. Разница между ними обусловлена конструктивными особенностями технологических систем, реализующих конкретный метод ППВ, а также присущими им энергетическими и технологическими возможностями.

Расчетные методы по определению характеристик качества поверхностного слоя после ППВ, базирующиеся на механическом подходе, не являются универсальными, поскольку не могут быть использованы в широком диапазоне материалов и способов обработки. Вопрос выбора наиболее объективного критерия упрочнения ДППВ до настоящего времени остаётся нерешённым.

В качестве одного из перспективных путей, позволяющего учесть многофакторность процессов пластической деформации, микро и субструктурных изменений и разрушения твёрдых тел в процессе ДППВ, их последующей эксплуатации, предлагается использовать энергетический подход, положив в его основу аналогию между процессами поглощения энергии кристаллической

решеткой при механическом нагружении и при нагреве, а для оценки эффекта упрочнения термодинамические характеристики материала.

Факторы, которые не позволяют рассматривать энергетический подход в достаточной степени научно обоснованным для оценки параметров качества поверхностного слоя, упрочнённого в процессе ППВ динамическими методами и прогнозирования эксплуатационных свойств деталей:

- не раскрыт механизм изменения энергетического состояния пластически деформируемого поверхностного слоя как в процессе ДППВ, так и в процессе эксплуатации;

- отсутствует экспериментальное обоснование количественной величины плотности их внутренней энергии, при которой обеспечивается повышение прочностных свойств деталей в процессе эксплуатации;

- не разработаны расчетные модели для оценки качества поверхностного слоя с учетом его энергетического состояния;

- не установлен энергетический критерий разрушения поверхностного слоя в процессе эксплуатации.

Затруднения в выработке научно обоснованных рекомендаций по применению энергетического подхода, перечисленные нерешённые вопросы, создают препятствия для его практической реализации в технологии изготовления деталей с целью повышения их эксплуатационных свойств.

В связи с этим, исследования, направленные на раскрытие механизма изменения энергетического состояния поверхностного слоя, модифицируемого ДППВ; экспериментальное обоснование количественной величины плотности их внутренней энергии, при которой обеспечивается эффективное повышение прочностных свойств деталей, и разработка расчетных моделей качества поверхности являются актуальными и должны быть продолжены.

**Целью работы является** разработка методов энергетической оценки качества поверхности и эксплуатационных свойств деталей, упрочненных динамическими методами ППВ, и выработка на этой основе методики проектирования технологий обработки этими методами.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующий комплекс задач:

1. Определить структуру модели изменения энергетического состояния поверхностного слоя в процессе ДППВ.

2. Экспериментально обосновать энергетический критерий упрочнения ДППВ.

3. Разработать на основе энергетического критерия ДППВ методы определения физико-механических характеристик качества поверхностного слоя.

4. Обосновать энергетическое условие разрушения поверхностного слоя в процессе циклического нагружения и предложить метод оценки влияния ДППВ на повышение усталостной долговечности деталей.

5. Установить зависимость для расчёта продолжительности обработки методами ДППВ.

6. Разработать методику и технологические рекомендации по проектированию технологии упрочнения ДППВ.

## ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЯ УПРОЧНЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ ППВ С ПОЗИЦИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОДХОДА

### 2.1. Энергетическая модель упрочнения ДППВ

Для разработки энергетической модели упрочнения поверхности деталей методами ДППВ в работе сформулированы следующие положения, допущения и ограничения:

1) Процесс ДППВ рассматривается на уровне локального микрообъёма твердого тела, равный молярному объёму  $V_m$ .

2) На изменение локального микрообъёма твердого тела расходуется только часть энергии внешних сил.

3) Внутренняя энергия локального микрообъёма твердого тела в общем случае состоит из потенциальной(исходной) и кинетической.

4) Предельное количество внутренней энергии в локальном объеме материале величина конечная и ее превышение приводит либо к изменению агрегатного состояния при нагревании (за счет появления и прироста кинетической энергии), либо к нарушению сплошности в виде нано-, микро- и макротрещин при динамическом упрочнении (за счет механической кинетической энергии инденторов). Максимальный эффект упрочнения будет, когда внутренняя энергия материала в поверхностном слое достигнет этого предела.

5) Разрабатываемая модель должна позволить рассчитывать это предельное возможное повышение внутренней потенциальной энергии упрочняемого материала без нарушения его сплошности.

6) Предельное значение внутренней энергии не зависит от вида энергии, закачиваемой в локальный объем, что позволяет использовать для его определения известные термодинамические константы- энтальпия, энтропия и др.

7) Модель должна связать предельное энергетическое состояние, модифицированного в процессе ППВ, поверхностного слоя с технологическими параметрами процесса упрочнения.

8) Модель должна быть проверяемой экспериментально.

9) Для подтверждения адекватности модели и проверки возможности ее применения при проектировании технологий можно использовать результаты исследований, приведенные в научно-технической литературе.

Используя энергетический подход, изложенный в главе 1, оценку предельной плотности внутренней энергии  $E_{пр}$ , накапливаемой в пластически деформируемом локальном микрообъеме поверхности, подвергаемой ДППВ, проведем с помощью величины равной разности теплосодержания (энтальпии) материала в твердом состоянии при температуре плавления  $H_{TS}$  и исходном:

$$\Delta H = \int_{T_{293^0}}^{T_{TS}} C_p dT, \text{ Дж/моль}$$

Условие изменения его энергетического состояния в процессе ППВ согласно (1.6) представим в виде:

$$E = E_0 + E_y, \quad E \leq \Delta H, \quad \Delta H = const.$$

Из этого условия следует, что, когда величина энергии  $E_0 + E_y$ , накопленной в пластически деформируемом локальном объеме  $V_m$ , достигнет величины  $\Delta H$ , будет достигнут эффект упрочнения, при котором локальные микрообъемы сохраняют (без разрушения) свои прочностные свойства.

Изменение энергетического состояния локального объема  $V_m$  в процессе ППВ за промежуток времени  $t$  запишем следующим образом:

$$E_y(t_i) = E_T + E_{пл}, \text{ Дж/моль}, \quad (2.1)$$

Для оценки влияния теплового эффекта на изменение энергетического состояния локального объема воспользуемся соотношением Клаузиуса [39], устанавливающего количество теплоты, переданное телу при температуре  $T$ :

$$E_T = TR \ln \frac{t}{\tau_0}, \text{ Дж/моль}, \quad (2.2)$$

где  $R$  – постоянная Больцмана, принимается равной  $8,314 \text{ Дж/К}\times\text{моль}$ ;  $T$  – абсолютная температура,  $\text{K}^\circ$ ;

$t$  – время пребывания системы в нагруженном состоянии, зависящее от количества ударно-импульсного контактного воздействия индентора на локальный объём, сопровождающегося его пластической деформацией (согласно [66; 97] 10–12 ударов), с;

$\tau_0$  – период тепловых колебаний атомов.

Результаты исследований, представленные в работах [35; 96], показали, что доля энергии, вносимая упругими деформациями, значительно меньше накопленной в результате пластической деформации. Это позволяет при дальнейшем анализе рассматривать только работу неупругих сил, затрачиваемых на микро и субструктурные изменения в локальном объеме, приводящих к изменению его энергетического состояния. Согласно [40] работу неупругих сил выразим следующим образом:

$$E_{\text{пл}} = V_m \sigma \lambda_{c_i}, \text{ Дж/моль}, \quad (2.3)$$

где  $V_m$  – молярный объём,  $\text{м}^3/\text{моль}$ ;  $\sigma$  – эквивалентное напряжение, определяемое характером силового воздействия на локальный объём),  $\text{МПа}$ , в условиях ДППВ  $\sigma = K_d \sigma_s$ , где  $K_d$  - коэффициент динамичности  $K_d$  (берется в зависимости от процесса из литературы),  $\sigma_s$  – статическое напряжение,  $\text{Па}$ ;  $\lambda_{c_i}$  – степень деформационного упрочнения, которую в большинстве работ, посвящённых исследованию динамических методов ППВ [9; 35; 110], предлагается оценивать соотношением:

$$\lambda_{c_i} = d_i/D. \quad (2.4)$$

Диаметр пластического отпечатка  $d_i$ , формируемого на поверхности в процессе ДППВ после  $i$ -кратного воздействия на неё индентора размером  $D$ , является величиной, комплексно отражающей влияние совокупности технологических факторов контактного взаимодействия индентора с обрабатываемой поверхностью на процесс пластической деформации. Взаимосвязь максимального диаметра, сформированного на поверхности пластического

отпечатка, с технологическими факторами контактного взаимодействия на основании работы [95] может быть представлена зависимостью:

$$d_i^* = \sqrt[4]{\frac{3m_{\Sigma} \cdot k_d \cdot V^2 \cdot D}{HV}}, \text{ мм}, \quad (2.5)$$

где  $m_{\Sigma}$  – приведённая масса инденторов, взаимодействующих с поверхностью  $m_{\Sigma} = \left(\frac{3}{4}\right)m$ ,  $m$  – масса единичного индентора, кг;  $V$  – скорость соударения инденторов с поверхностью, м/с;  $HV$  – твердость материала, Па;  $k_d$  – коэффициент диссипации обрабатываемой среды.

Как следует из (2.5), основными факторами, определяющими эффект упрочнения динамическими методами ППВ, являются физико-механические характеристики обрабатываемого материала, диаметр инденторов обрабатываемой среды и скорость их соударения с поверхностью.

Скорость инденторов обрабатываемой среды, как показано в табл. 2.1, зависит от конструктивных особенностей устройств, реализующих метод ДППВ.

Таким образом, уравнение (2.6) с учётом (2.3–2.5) можно записать в виде:

$$E_{\text{пл}} = V_m \sigma \sqrt[4]{\frac{3m_{\Sigma} \cdot k_d \cdot V^2}{HV \cdot D^3}}, \text{ Дж/моль}, \quad (2.6)$$

Как было показано на рис. 1.7 в разделе 1.3, только часть механической работы внешнего силового воздействия на поверхность материала затрачивается на изменение энергетического состояния локального объёма. Другая часть энергии (работы) превращается в тепловую энергию. Для учёта этого экспериментально установленного факта целесообразно в зависимость (2.6) ввести коэффициент накопления энергии  $k_n$ , который отражает долю запасаемой энергии в деформируемых объёмах материала:

$$E_{\text{пл}} = k_n V_m \sigma \sqrt[4]{\frac{3m_{\Sigma} \cdot k_d \cdot V^2}{HV \cdot D^3}}, \text{ Дж/моль}, \quad (2.7)$$

Кроме того, полученная зависимость применима для идеальных кристаллов. При использовании её применительно к реальным поликристаллическим материалам, характеризующимся наличием дефектов и несовершенствами

строения, необходимо учесть неоднородность распределения статических напряжений по межатомным связям.

Таблица 2.1

Расчетные зависимости для определения скорости соударения инденторов обрабатываемой среды при обработке различными динамическими методами ППВ

| Метод ППД | Расчётная зависимость скорости   | Источн<br>ик | Примечание  |
|-----------|--|--------------|---|
| ВиУО      | $V_{min} = \frac{R_z D \pi \frac{\nu}{1+\nu} C \sigma_T \chi}{K_M} \left( \frac{0.477}{b} \right)^{\frac{1}{\nu}} \cdot \frac{(\nu-1)^{\frac{\nu-1}{2\nu}}}{2\nu}$   | [75]         | $R_z$ – высота микронеровностей поверхности, $C$ – коэффициент стеснения (для сферы $C = 2,8-3$ ); $\sigma_T$ – предел текучести; $K_M$ – коэффициент массы рабочей среды и податливости материала; $b, \nu$ – параметры опорной кривой микропрофиля; $D$ – диаметр рабочей среды; $\chi$ – коэффициент динамичности  |
| ЦРО       | $V = R_{\text{эф}} \cdot \omega \cdot K_{\text{эф}}$   | [125]        | $R_{\text{эф}}$ – эффективный радиус вращающегося ротора; $\omega$ – угловая скорость вращения ротора; $k_{\text{эф}}$ – эмпирический коэффициент   |
| ГДО       | $V = \frac{21.2 k_{\text{шж}}}{D_c^2} \left( \frac{(17+6.3 P_{\text{ж}})}{\gamma_{\text{ш}}} + V_{\text{ж}} \right)$   | [97]         | $k_{\text{шж}}$ – коэффициент, учитывающий проскальзывание шарика относительно потока жидкости; $D_c$ – диаметр сопла установки; $P_{\text{ж}}$ – давление жидкости; $V_{\text{ж}}$ – объемный расход жидкости; $\gamma_{\text{ш}}$ – удельный вес материала шариков  |
| ДО        | $V = \frac{21.2}{D_c^2} \left( \frac{(17+6.3 P_{\text{воз}})}{\gamma_{\text{ш}}} + V_{\text{воз}} \right)$   | [112]        | $D_c$ – диаметр сопла установки; $P_{\text{воз}}$ – давление сжатого воздуха; $V_{\text{воз}}$ – объемный расход воздуха; $\gamma_{\text{ш}}$ – удельный вес материала дробы  |
| УМЩ       | $V = \frac{2\pi R n}{P f},$<br>$P = \frac{4EJ}{L^2} t g \frac{2}{3} \Theta \sin \Theta,$<br>$\Theta = \arccos \left( 1 - \frac{i}{0.85L} \right)$  | [80]         | $R$ – радиус щетки; $n$ – число оборотов щетки; $P$ – сила прижима; $EJ$ – жесткость ворсины щетки; $L$ – длина ворсины щетки; $\Theta$ – угол отгиба ворсины от вертикального положения; $i$ – величина натяга щетки ( $i = 0,05-0,15$ мм)   |
| ШСУ       | $V = \sqrt{\frac{2E_y}{m}} = \sqrt{\frac{3n \cdot E_y}{k}},$<br>$E_y = \sqrt{\frac{4R_a \sqrt{\pi \ln(i^2/2S)} (R_H - R_a \sqrt{\pi \ln(i^2/2S)})}{\left( 1.54 \cdot 10^{-2} \cdot HB \left( 20 \frac{R_y}{HB} \right)^{0.25} \right)^2}}$ | [2]          | $n$ – количество стержней в пучке; $k$ – коэффициент передачи удара ( $k = 0,1-0,02$ ); $E_y$ – энергия удара; $R_a$ – среднее арифметическое в отклонении микронеровностей; $R_H$ – приведенный радиус заточки рабочей части инструмента; $S$ – шаг микронеровностей; $L$ – длина индентора; $HD, HB$ – динамическая твердость и твердость по Бринеллю соответственно упрочняемого материала |

Если на макроскопический элемент твёрдого кристаллического тела действуют равномерно распределённые по объёму или сечению внешние напряжения  $\sigma$ , то в локальных микрообъёмах на отдельных атомных связях напряжения могут быть больше. Это обстоятельство можно учесть посредством коэффициента перенапряжений на межатомных связях  $k_\sigma$ . Тогда зависимость (2.7) можно записать в виде:

$$E_{\text{пл}} = k_\sigma k_n V_m \sigma \sqrt[4]{\frac{3m_\Sigma \cdot k_d \cdot V^2}{HV \cdot D^3}}, \text{ Дж/моль} \quad (2.8)$$

Таким образом, с учетом вышеуказанных зависимостей (2.2–2.8), уравнение энергетического баланса (2.1) модифицированного ДППВ локального объёма можно записать в следующем виде:

$$E_0 + TR \ln(t/\tau_0) + k_\sigma k_n V_m \sigma \sqrt[4]{\frac{3m_\Sigma \cdot k_d \cdot V^2}{HV \cdot D^3}} \leq \Delta H, \text{ Дж/моль}, \quad (2.9)$$

где  $R = 8,314$  Дж/К×моль – постоянная Больцмана;  $T, K^\circ$ ;  $t, \tau_0, c$ ;  $D, \text{ мм}$ ;  $\sigma, \text{ НВ, Па}$ ;  $V, \text{ м/с}$ ;  $m_\Sigma, \text{ кг}$ ;  $k_\sigma$  – коэффициент перенапряжений на межатомных связях;  $k_n$  – коэффициент, учитывающий долю механической энергии в общем балансе работы деформации, накапливаемой в локальном объеме поверхностного слоя (устанавливается экспериментально);  $k_d$  – коэффициент диссипации обрабатываемой среды.

В реальных условиях реализации процессов ППВ динамическими методами необходимо учитывать тот факт, что тепловой эффект, сопровождающий процесс ППВ, приводит к изменению условий деформирования локальных объёмов, обусловленных изменением начальной температуры  $T_0$  поверхностных слоев в среднем на величину  $\Delta T$ , устанавливаемую экспериментально. В этой связи расчётная температура определяется как:

$$T = T_0 + \Delta T, K. \quad (2.10)$$

Полученная на основе ранее проведённых исследований энергетическая модель упрочнения динамическими методами в процессе ППВ (2.9) позволяет определить предельное энергетическое состояние граничных с окружающей средой локальных объёмов поверхностного слоя, расположенных у поверхности детали, при котором они сохраняют (без разрушения) свои прочностные свойства.

Кроме того, предложенная модель позволяет решить как прямую, так и обратную технологические задачи. В первом случае, исходя из выбранных метода и условий упрочняющей обработки, прогнозировать достигаемый эффект упрочнения путём оценки реализуемого изменения энергетического состояния локальных объёмов. Во втором, исходя из установленного для обрабатываемого материала критерия упрочнения  $\Delta H$ , являющегося термодинамической

константой, выбрать метод и рациональные условия, а также режимы упрочняющей обработки ППВ.

## **2.2. Обоснование метода исследования эффекта упрочнения ДППВ**

Выбор и разработка методики экспериментальных исследования эффекта упрочнения поверхностного слоя проводился с учетом особенностей, вытекающих из энергетической модели процесса ППВ динамическими методами.

Как следует из модели (2.9) основной вклад в микро и субструктурные преобразования вещества материала и его изменение в результате упрочнения, вносят: механический и тепловой факторы. Плотность внутренней энергии пластически деформированных локальных объёмов поверхностного слоя, является интегральным параметром и численно равна мгновенной совокупной работе всех сил, затрачиваемых на активацию микро и субструктурных преобразований, протекающих в них в процессе ДППВ.

Принимая во внимание особенности того, что активация поверхностных слоёв при ППВ динамическими методами имеет механический характер, и проведя анализ методов экспериментальной оценки внутренней энергии при механической активации материалов [66], в работе, в качестве наиболее предпочтительного метода экспериментальных исследований энергетического состояния упрочнённого поверхностного слоя был выбран калориметрический метод, основанный на измерении тепла, выделяемого в металле.

На рис. 2.1 представлена схема оценки тепловых эффектов калориметрическим методом, в которой образец 3 помещается в емкость 1 с охлаждающей средой 2 и образцу сообщается знакопеременная вибрационная нагрузка.

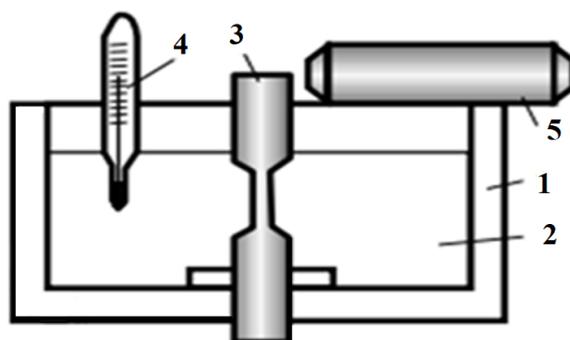


Рис. 2.1. Принципиальная схема оценки тепловых эффектов калориметрическим методом

В процессе усталостных испытаний микроскопом 5 контролируется амплитуда виброперемещений, а термометром 4 – нагрев среды 2 под действием тепловыделения в материале.

В качестве преимуществ калориметрических измерений тепловых эффектов выделяют: объективность и достаточную точность, а в качестве недостатков выделить инерционность, необходимость контроля всех источников излучения тепла, нечувствительность к анизотропии и структуре материала.

При ППВ динамическими методами (рис. 1.7) протекание в локальном объёме поверхности микро и субструктурных изменений затрачивается строго определенная работа  $A$ , которая расходуется на пластическую деформацию  $E_{пл}$  и тепловую энергию  $Q$ . Таким образом, используя калориметрический метод, возможно путем выделения теплового эффекта оценить запасённую в пластически деформируемом поверхностном слое энергию.

### **2.3. Экспериментальные исследования энергетического состояния упрочнённого поверхностного слоя**

#### **2.3.1. Экспериментальный комплекс для проведения исследований**

##### *Структура калориметрического экспериментального комплекса*

С целью реализации калориметрического метода, выбранного для исследований энергетического состояния пластически деформированного

локального объёма поверхностного слоя, разработан экспериментальный комплекс рис. 2.2.

Основными элементами комплекса являются: калориметрическая камера, ударник, датчик измерения температуры. Принцип работы на экспериментальном комплексе состоит в следующем. Исследуемый образец 1 помещается в цилиндрическую калориметрическую камеру 2 и базируется в ней по плоскости и цилиндрическому отверстию. Цилиндрическая калориметрическая камера 2 устанавливается в корпус 7, который в свою очередь прикрепляется к установочной плоскости маятникового копра 9. Камера 2 закрывается крышкой 3, в которой предусмотрено отверстие, обеспечивающее доступ к образцу индентора со сферическим торцом 4, ввинченного в ударник 5. Индентор 4 осуществляет ударное воздействие на образец 1 и таким образом реализует процесс динамическими методами ППВ. В камеру 2 через отверстие вводится датчик измерения температуры 6, передающий результаты на измерительный прибор.

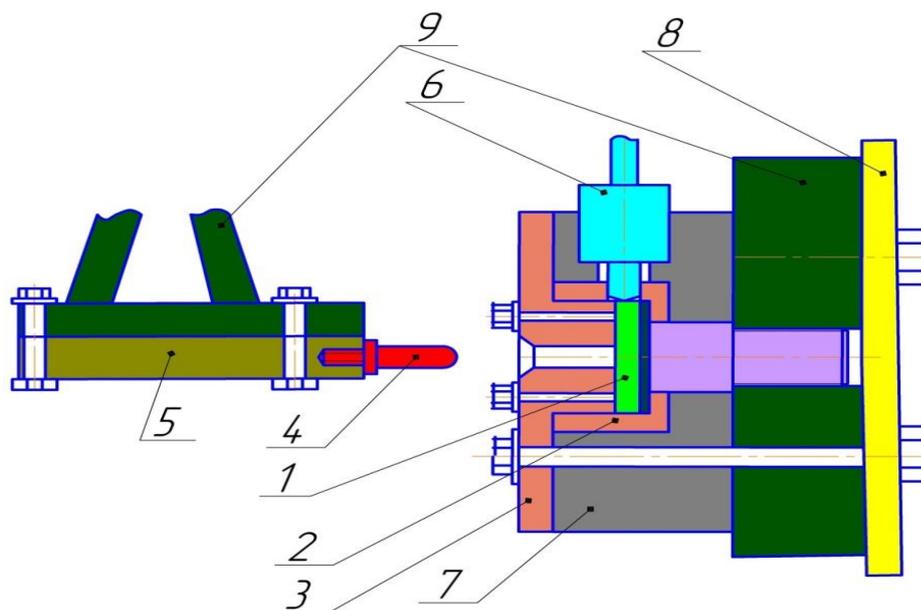


Рис. 2.2. Структура калориметрического комплекса:  
1 – исследуемый образец; 2 – калориметрическая камера;  
3 – крышка; 4 – индентор; 5 – ударник; 6 – датчик измерения температуры; 7 – корпус; 8 – пластина; 9 – базовые элементы маятникового копра

### *Основные элементы комплекса и их конструктивное исполнение*

Базовым элементом комплекса является маятниковый копер, представленный на рис. 2.3. Он используется для того, чтобы в условиях динамического приложения нагрузок и при повышенных скоростях деформирования исследовать свойства материалов, используемых для производства той или иной продукции. Он находит свое применение в лабораториях, научно-исследовательских центрах, на предприятиях, в отделах контроля работы и качества продукции, характеризуется небольшим весом, имеет компактные габариты, высокую мощность и наибольший запас потенциальной энергии. Используемый в комплексе копер изготовлен по ГОСТ 10708-82 в исполнении с ручным возвратом груза-индентора. Конструкция маятника позволяет задавать необходимый стартовый угол  $\alpha$ .

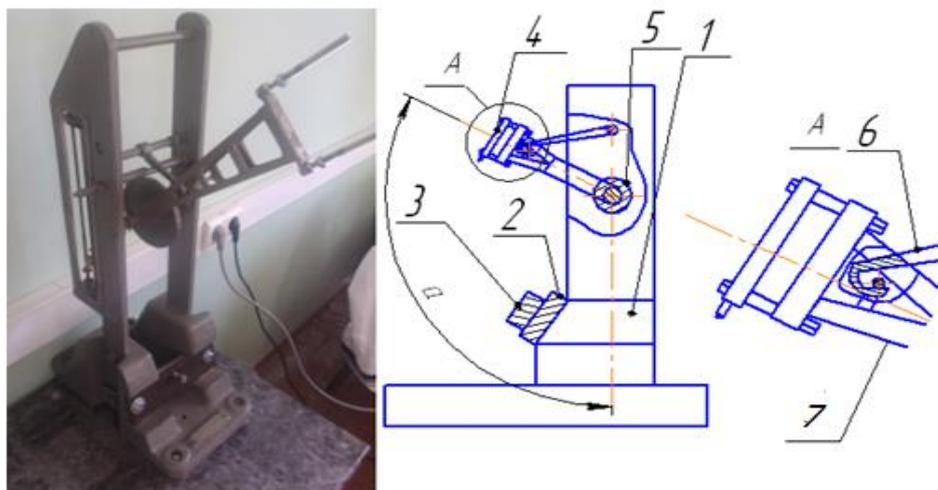


Рис. 2.3. Маятниковый копер

К основанию 1 маятникового копра с помощью резьбового соединения крепится пластина 2, на которую устанавливается корпус 3 со встроенной в него калориметрической камерой. Принцип работы копра следующий. Рабочий орган копра – маятник 7 с грузом-индентором 4 качаются в подшипниках 5, зафиксированных на станине. Его возводят вручную в исходное положение и фиксируют специальной защелкой 6. После того как испытуемый образец устанавливается в калориметрическую камеру, маятник освобождается и, падая,

деформирует его. Измеренный угол  $\alpha$  вылета позволяет определить работу  $A$ , затраченную на деформирование испытуемого образца.

Общий вид калориметрического устройства представлен на рис. 2.4. Корпус 1 является основой цилиндрической калориметрической камеры 10 (рис 2.5), для установки которой в нём предусмотрено специальное отверстие. Сам корпус вместе с камерой базируется по цилиндрической поверхности пальца 4, вкрученного в плиту 3.

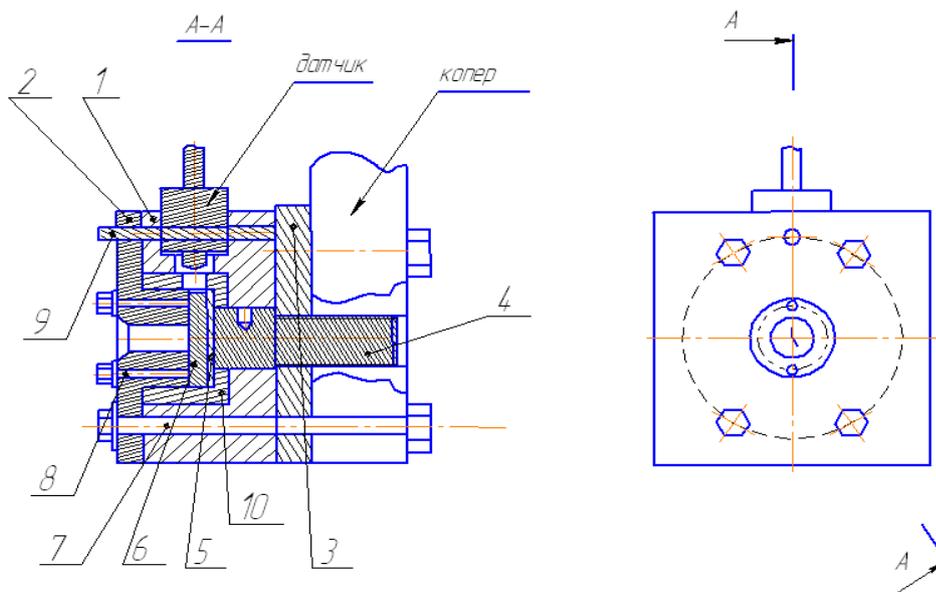


Рис. 2.4. Общий вид калориметрического устройства

Исследуемый образец 6 устанавливается в калориметрическую камеру 10 и базируется по цилиндрической поверхности и торцевой плоскости, соприкасающейся с плоскостью прокладки 5. Камера закрывается крышкой 2 с помощью винтов 8 с целью обеспечения герметичности камеры. В крышке 2 предусмотрено отверстие для прохода индентора, осуществляющего ударное воздействие на образец 6. Корпус вместе с крышкой 2 прикручивается четырьмя болтами М4 к пластине 3. Пластина 3 устанавливается на базовую плоскость основания копра и закрепляется на ней двумя болтами М10.

На рис. 2.5 представлена конструкция корпуса калориметрической камеры. Базирование осуществляется по двойной направляющей базе, роль которой выполняет поверхность 3.

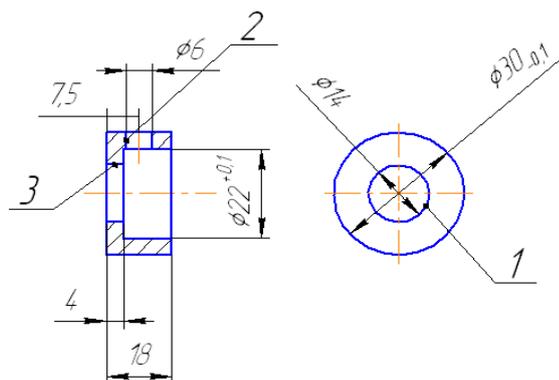


Рис. 2.5. Калориметрическая камера

Базирование самой камеры в корпусе осуществляется по поверхности 2, она выполняет функции двойной опорной базы. Поверхность 1 служит для обеспечения контакта датчика температуры с испытуемым образцом. Отверстия 4 служат для закрепления корпуса совместно с крышкой на плите.

В результате такого конструктивного исполнения устройства были решены основные функции, которые должна обеспечивать калориметрическая камера:

- сохранение энергии внутри системы путём уменьшения теплопередачи в окружающую среду;
- базирование исследуемого образца;
- доступ для ударного воздействия индентора на образец;
- доступ для измерений температуры образцов посредством датчика.

При выборе материала калориметрической камеры, крышки и прокладки требовалось, чтобы он обладал:

- 1) высокой удельной теплоемкостью, т. к. данная система должна обеспечить минимальный отвод тепла в окружающую среду;
- 2) хорошей обрабатываемостью с целью возможности изготовления из него деталей необходимой конфигурации.

Анализ имеющихся в наличии материалов, их удельной теплоемкости, представленных в табл. 2.2, показал, что наиболее приемлемым материалом с учётом сформулированных требований является текстолит.

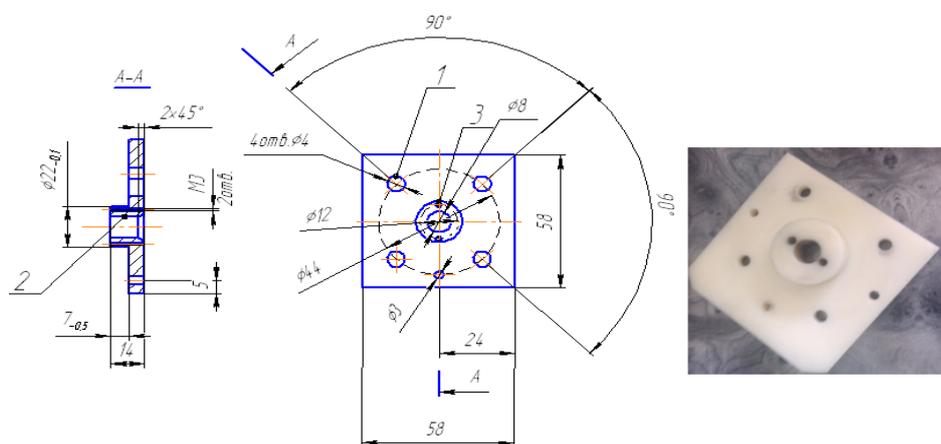


Рис. 2.6. Крышка

Таблица 2.2

Средняя удельная теплоемкость некоторых твердых материалов при 0–100 °С, кДж / (кг\*К)

| Вид материала      | Теплоемкость кДж/(кг*К) |
|--------------------|-------------------------|
| бронза             | 0,385                   |
| гипс               | 1,09                    |
| кирпич огнеупорный | 0,88–1,01               |
| кожа               | 1,51                    |
| полипропилен       | 1,67–2,09               |
| резина             | 1,68                    |
| свинец             | 0,13                    |
| сталь              | 0,5                     |
| текстолит          | 1,47                    |

Крышка, конструкция которой представлена на рис. 2.6, помимо своей теплоизоляционной функции, обеспечивает доступ для ударного взаимодействия индентора с испытуемым образцом, для чего в ней предусмотрено отверстие 2. Два резьбовых отверстия М3 необходимы для затягивания двух текстолитовых пластин, которые, зажимая образец, создают необходимую жесткость системы.

На рис. 2.7 представлено конструктивное исполнение пальца, цилиндрическая поверхность 1 которого выступает в качестве направляющей базы для определения положения камеры. Поверхность 2 является опорной базой для текстолитовой прокладки, которая своими теплоизоляционными свойствами уменьшает передачу тепла на металлический палец.

Пластина (рис. 2.7) является связующим звеном между копром и корпусом калориметрической камеры. При помощи двух отверстий 15 x 20 и двух винтов

M10 она прикрепляется к копру. В свою очередь на пластине при помощи резьбового соединения M10 ввинчивается палец, а четыре отверстия M4 позволяют жестко соединить плиту с корпусом. Палец и плита выполнены из углеродистой стали марки Сталь 35.

В качестве ударного элемента, обеспечивающего механический характер активации пластической деформации испытуемого образца путем непосредственного контакта при опускании с определенной высоты, спроектирован и разработан ударник (рис. 2.8; 2.9), который состоит из индентора 1 и груза 2.

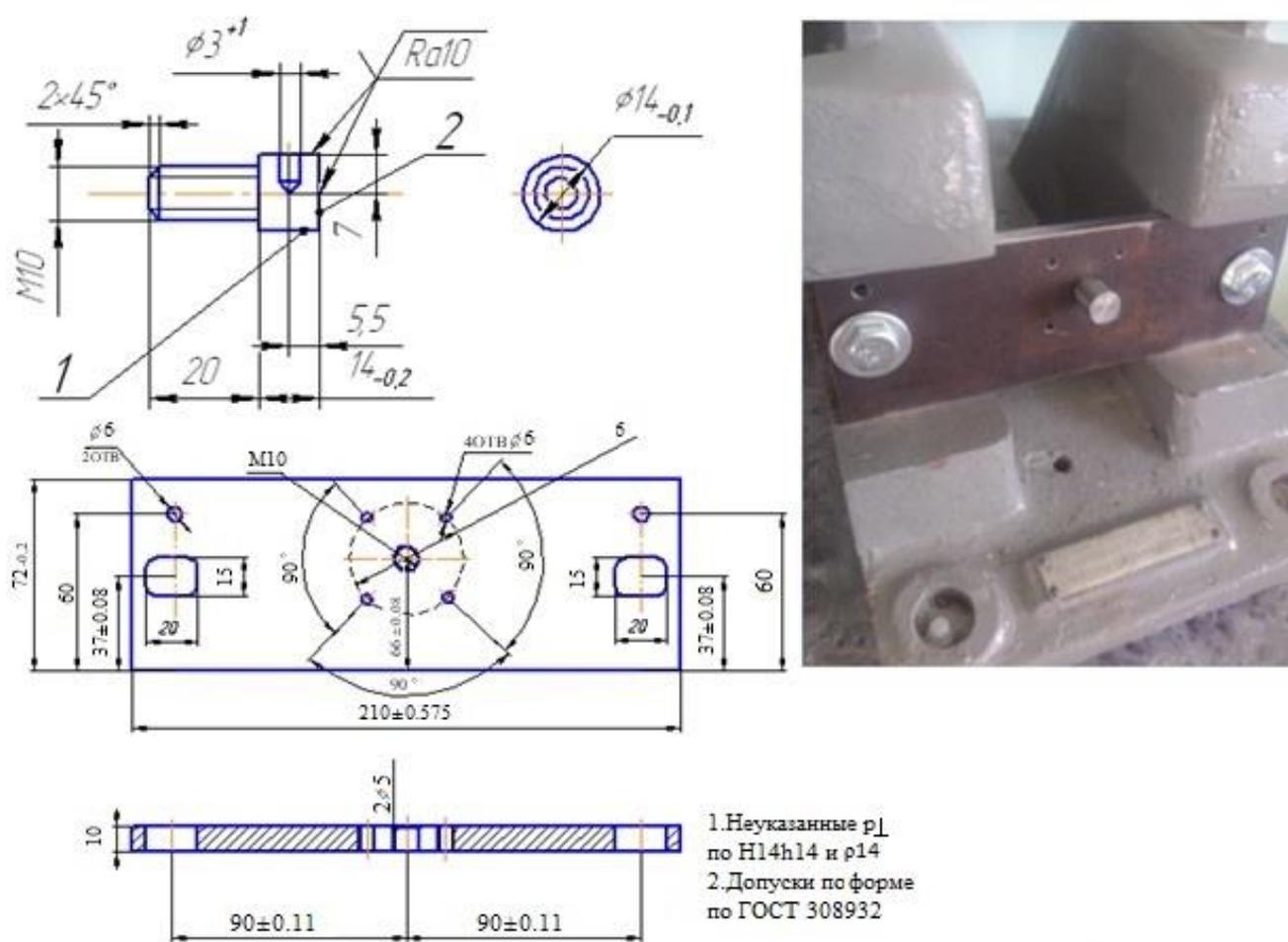


Рис. 2.7. Конструкция пальца и пластины для установки корпуса калориметрической камеры

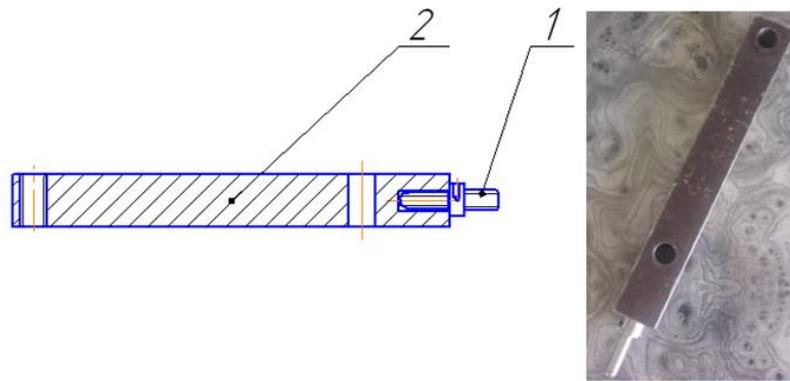


Рис. 2.8. Ударник с индентором

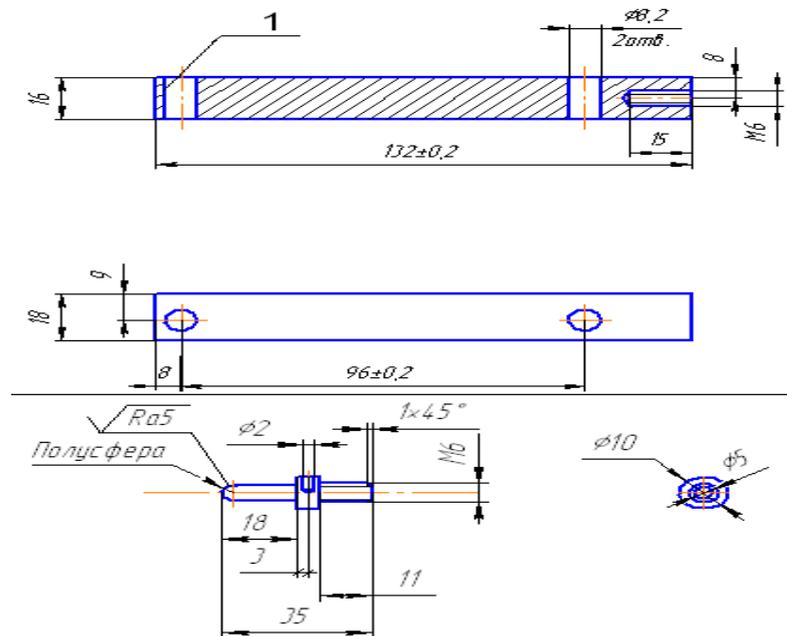


Рис. 2.9. Конструктивное исполнение груза и индентора

Учитывая назначение индентора, связанное с ударно-силовым воздействием на металлический образец, он изготовлен из закаленной стали 40Х. Груз изготовлен из стали 45 и прикрепляется к маятнику при помощи шпилек М8, проходящих через отверстия в теле груза 1 (рис. 2.9).

Измерение температуры образцов осуществлялось термометром TESTO 905-T2 (рис. 2.10). Особенностью представленного датчика может являться: термопара с пружинами; высокая точность и быстродействие; измерительный диапазон: – 50...+350 °С с максимальной погрешностью 0,1 °С.



Рис. 2.10. Термометр TESTO 905-T2

**Расчёт энергетических параметров экспериментального комплекса**

Энергетические параметры маятникового копра определяются из закона сохранения энергии как разность потенциальной и кинетической энергии в момент удара.

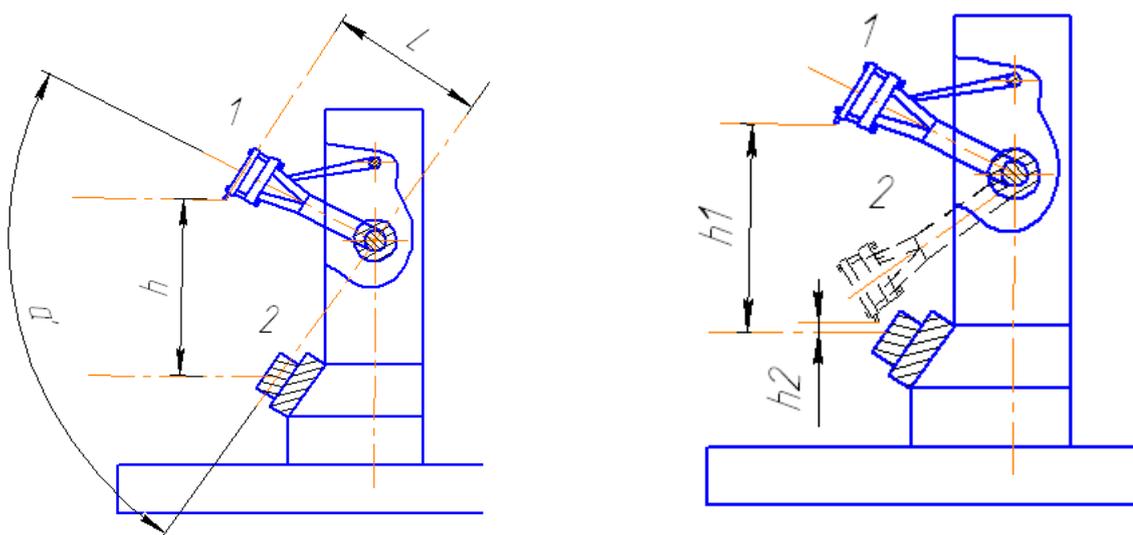


Рис. 2.11. Схема к расчёту энергии удара на маятниковом копре

Из рис. 2.11 следует, что потенциальная энергия груза-индентора в точке 1 полностью переходит в кинетическую энергию в точке 2, т. е.:

$$A_{вс} = E_{к2} - E_{п2} = E_{п1}.$$

Так как точкой равновесия является точка соприкосновения груза-индентора и образца, угол отклонения  $\alpha'$  индентора необходимо отсчитывать от прямой, проходящей через эту точку и через центр вращения подшипника:

$$E_{п1} = mgL(1 - \cos\alpha'),$$

где  $m$  – масса груза индентора, кг;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$L$  – длина маятника, мм.

Учитывая, что удар является упругим, повторный удар после отскока груза-индентора всего один, необходимо определить энергию этого повторного удара. Применение видеосъемки с последующей обработкой на персональном компьютере позволило установить отклонение груза индентора от точки равновесия первого удара и продолжительность его взаимодействия с обрабатываемым образцом на уровне  $t = 1,2 \cdot 10^{-4}$  с. Это дало возможность определить величину отношения высоты подъема груза  $h_1$  индентора к высоте его отскока  $h_2$  от обрабатываемой поверхности после удара:

$$h_1/h_2 = 154/2, \text{ мм (исходя из замеренных размеров)}$$

Таким образом, энергия второго удара будет равна  $A_{BC_2} = \frac{2 A_{BC_1}}{154}$ .

Работу, осуществляемую индентором при однократном взаимодействии с поверхностью образца, определяем следующим образом:

$$A_{BC_{\text{общ}}} = A_{BC_1} + A_{BC_2} = mgL(1 - \cos\alpha) + \frac{2mgL(1 - \cos\alpha)}{154}.$$

Приняв  $\alpha = 103^\circ$ ;  $g = 9,8$  м/с<sup>2</sup>;  $L = 0,335$  м;  $m = 0,39$  кг (масса рассчитывалась как алгебраическая сумма масс индентора, груза, шести гаек и двух болтов:  $m = m_{\text{инд}} + m_{\text{гр}} + 6m_{\text{г}} + 2m_{\text{б}}$ ), получим:

$$A_{BC_{\text{общ}}} = 0,39 \times 9,8 \times 0,335 \text{ м} (1 - \cos 103^\circ) + \frac{2 \cdot 0,39 \text{ кг} \cdot 9,8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \cdot 0,335 \text{ м} (1 - \cos 103^\circ)}{154} = 1,59 \text{ кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}^2.$$

Скорость соударения индентора с поверхностью образцов будет равна:

$$V_k = \sqrt{\frac{2A_{BC_{\text{общ}}}}{m}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,59}{0,39}} = \sqrt{\frac{3,18}{0,39}} = 2,86 \text{ м/с}.$$

Силу контактного воздействия индентора на поверхность образца определим из соотношения:

$$F = m \cdot \frac{V_k}{t} = 0,39 \cdot \frac{2,86}{8 \cdot 10^{-5}} = 13,9 \text{ кН},$$

где  $t$  – время контактного взаимодействия индентора с образцом, установленное посредством видеофиксации видеокамерой,  $t = 8 \cdot 10^{-5}$  с.

На основании этих зависимостей определим работу, затрачиваемую на деформирование локального объема поверхности, равного мольному объему:

$$A_i = V_m \cdot \frac{4 \cdot F}{\pi \cdot d_i^2}, \text{ кДж/Моль} = 7,1 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{4 \cdot 13,9}{\pi \cdot 2,025^2 \cdot 10^{-6}} \cdot 1 = 394,76 / 12,876 = 30,65$$

кДж/моль,

где  $d_i$  – диаметр пластического отпечатка, замеренный на установке УИМ-3;  $i$  – количество ударных воздействий индентора;  $V_m$  – мольный объем, мм<sup>3</sup>/моль.

Общий вид калориметрического экспериментального комплекса (рис. 2.12).



Рис. 2.12. Общий вид калориметрического комплекса

### ***Образцы для исследования***

- 1) сталь 20 круг h11-20 ГОСТ 7417-75/ 20-В-М2-ТВ2-ТО ГОСТ 1050-88;
- 2) сталь 35 круг h11-35 ГОСТ 7417-75/ 20-В-М2-ТВ2-ТО ГОСТ 1050-88;
- 3) сталь 45 круг h11-45 ГОСТ 7417-75/ 20-В-М2-ТВ2-ТО ГОСТ 1050-88.

Габаритные размеры образцов представлены на рис. 2.13. Химический состав и механические свойства материала образцов приведены в табл. 2.3 и 2.4.

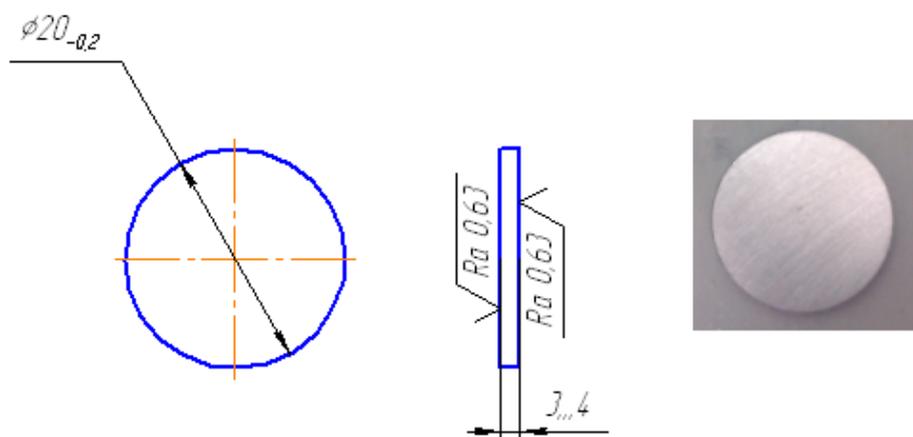


Рис. 2.13. Образец

Таблица 2.3

Химический состав материала образцов

| Марка стали | Массовая доля элементов, % |           |           |      |
|-------------|----------------------------|-----------|-----------|------|
|             | углерод                    | кремний   | марганец  | хром |
| 20          | 0,17-0,24                  | 0,17-0,37 | 0,35-0,65 | 0,25 |
| 35          | 0,32-0,4                   | 0,17-0,37 | 0,5-0,8   | 0,25 |
| 45          | 0,42-0,5                   | 0,17-0,37 | 0,5-0,8   | 0,25 |

Таблица 2.4

Механические характеристики материала образцов

| Марка стали | $\sigma_T$ , предел текучести, МПа | $\sigma_B$ , временное сопротивление разрыву, МПа | Ударная вязкость, Дж/см <sup>2</sup> | Твердость по HV, МПа |
|-------------|------------------------------------|---|--------------------------------------|----------------------|
| 20          | 245                                | 500-650   | 88                                   | 163                  |
| 35          | 295                                | 600-750   | 69                                   | 111-167              |
| 45          | 355                                | 650-800   | 49                                   | 170                  |

Изготовление образцов производилось по следующей технологии:

- 1) токарно-отрезная операция, на токарно-универсальном станке 16E20 указываемые прутки нарезались на диски толщиной 4<sub>-0,2</sub> мм;
- 2) плоскошлифовальная операция, на плоскошлифовальном станке 3Л722В с двух сторон образец шлифовался в размер 3...4 мм;
- 3) отжиг.

### 2.3.2. Технические средства контроля параметров качества пластически деформированных отпечатков

Геометрические размеры отпечатка, пластически деформированного на поверхности образцов, определялись на универсальном измерительном микроскопе типа УИМ-21, представленном на рис. 2.14, который предназначен для проведения линейных и угловых измерений разнообразных изделий в прямоугольных и полярных координатах.

Технические характеристики УИМ-21:

|                                  |                      |
|----------------------------------|----------------------|
| Предел измерений X               | 0–200 мм             |
| Предел измерений Y               | 0–100 мм             |
| Пределы измерения углов          | 0–360°               |
| Цена деления                     | 0,001 мм/1'          |
| Наибольший вес измеряемой детали | 10 кг                |
| Вес                              | 414 кг               |
| Габаритные размеры прибора       | 1145 x 1060 x 705 мм |

Измерение микротвердости поверхности проводилось на приборе Nanotest 600 PeatForm 3 (Micromaterials, Великобритания) рис.2.15 с использованием метода Оливера-Фарра. В ходе эксперимента осуществлялась регистрация глубины внедрения пирамидального алмазного индентора Берковича при приложении нагрузки 200 мН. Результаты индентирования, полученные путём усреднения 10 внедрений индентора на расстоянии 30 мкм друг от друга, представлены на рис. 2.16.



Рис. 2.14. Микроскоп УИМ-21



Рис. 2.15. Nanotest 600

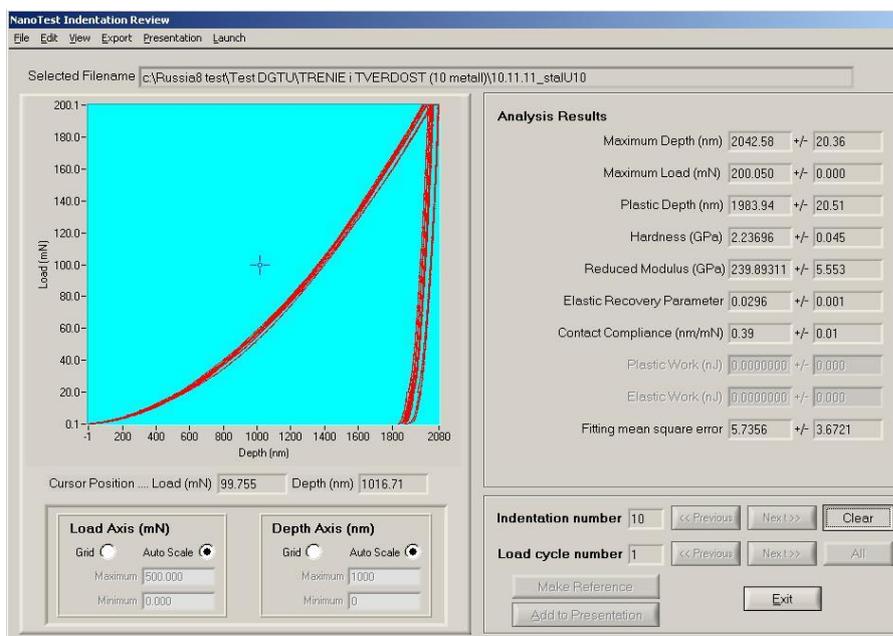


Рис. 2.16. Результаты, полученные на Nanotest 600

### 2.3.3. Методика проведения исследований

#### 2.3.3.1. Определение энергетического состояния пластически деформированного локального объёма

В главе 1 показано, что накапливаемая в деформируемом локальном микрообъёме поверхностного слоя внутренняя энергия при  $i$ -кратном силовом нагружении ( $i \geq 1$ ) равна:

$$E_{пл} = A - Q, \text{ кДж/моль}, \quad (2.11)$$

где  $A$  - работа, затрачиваемая на деформирование локального объёма поверхности, равного мольному объёму, определялась по формуле:

$$A = V_m \cdot \frac{4 \cdot F}{\pi \cdot d_i^2} \cdot i^n, \text{ кДж/моль}, \quad (2.12)$$

$n$  – коэффициент, учитывающий потери энергии при многократном соударении,  $n \approx 0,2 \sim 0,22$ .

$Q$  – количество тепла, выделившегося в процессе деформирования устанавливалось на основании экспериментальной оценки изменения температуры образцов после деформирования, по зависимости:

$$Q_i = c_\mu(T_{ki} - T_n), \text{ кДж/моль}, \quad (2.13)$$

$c_\mu$  – молярная теплоемкость материала образца, кДж/К×моль;  $T_{ki}$  – конечная температура образца, К;  $T_n$  – начальная температура образца, К.

Термодинамический критерий, определяющий энергетическое состояние пластически деформированного (без разрушения) локального объема для материала образцов, определялся по соотношению:

$$\Delta H = \int_{T_{исх}}^{T_{пл}} C dT, \text{ кДж/моль}, \quad (2.14)$$

где  $T_{пл}$ ,  $T_{исх}$  – температура плавления материала и в исходном состоянии.

Доля внутренней энергии, накапливаемой в локальном объеме в результате пластической деформации, определялась по формуле:

$$E_M = V_m \times HV, \text{ кДж/моль}. \quad (2.15)$$

Доля внутренней энергии, накапливаемой в локальном объеме в результате теплового эффекта, вычислялась из соотношения:

$$E_T = E_{уп} - E_M, \text{ кДж/моль}. \quad (2.16)$$

### ***2.3.3.2. Последовательность исследований:***

1. Установить образец в калориметрическую камеру экспериментального комплекса.
2. Посредством термометра зафиксировать исходную температуру  $T_n$  калориметрической системы, °С.
3. Установить груз с индентором в положение под углом  $\alpha$  по отношению к плоскости образца и зафиксировать защелкой.
4. Расфиксировать защёлку и произвести ударное воздействие индентором по образцу.
5. Через определённый промежуток времени (15–20 секунд) произвести замер температуры системы  $T_{ki}$ .
6. Удалить образец из калориметрической камеры экспериментального комплекса.

7. На микроскопе замерить сформированный на поверхности диаметр пластического отпечатка  $d_i$ .

8. Осмотреть состояние поверхности на предмет выявления микротрещин.

9. На приборе Nanotest 600 определить твердость пластически деформированной зоны отпечатка путем индентирования по «маятниковому» методу.

Действия 1–9 проделать для всех запланированных для исследований партий образцов. План исследований предусматривает для каждого после первого следующего образца из одноименного материала последовательное увеличение количества ударов на 2 и повторение идентичного эксперимента не менее 45 раз.

Результаты замеров температуры в калориметрической системе до и после ударного воздействия на образцы, а также размеров и микротвердости, формируемой на поверхности образца пластически деформированной зоны, заносятся в таблицы.

### **2.3.3.3. Обработка опытных данных**

На основе полученных экспериментальных данных для каждого образца рассчитывается:

1. Величина выделившегося в процессе деформирования количества тепла  $Q_i$  по формуле (2.13).

2. Работа  $A_i$ , затрачиваемая на деформирование локального объема при механическом воздействии на поверхность (2.12).

3. Величина энергии, накопленной в пластически деформированном локальном объеме поверхности  $E_{уп}$  (2.11).

4. Доля внутренней энергии, накопленной в локальном объеме поверхностного слоя в результате механического воздействия, в общем балансе его энергетического состояния, по формуле (2.15).

5. Доля внутренней энергии, накопленной в локальном объеме поверхностного слоя в результате теплового эффекта, в общем балансе его энергетического состояния, по формуле (2.16).

На основе проведенных расчетов по формулам (2.11-2.16) строились зависимости:

- энергетического состояния локального объема, от количества актов ударно-силового воздействия на него и её составляющих (механической и тепловой);
- изменения работы, затрачиваемой на деформирование локального объема поверхности, равного мольному объему в зависимости от количества актов ударно-силового воздействия, а также изменения внутренней энергии и теплового эффекта.

На основе этих зависимостей устанавливалось:

- предельное количество актов контактного взаимодействия инденторов с поверхностью, при котором стабилизировался размер пластически деформированной зоны и её твёрдости;
- количество актов контактного взаимодействия инденторов с поверхностью, приводящих к разрушению поверхности (в виде микротрещин);
- соизмеримость предельного энергетического состояния локального пластически деформированного объёма поверхности отпечатка с величиной  $\Delta H$ , принимаемой за термодинамический критерий упрочнения;
- величина энергии, определяющая процесс разрушения поверхности;
- доля величины энергии, определяющей энергетическое состояние локального микрообъёма в общем объёме всей работы, затраченной на его модификацию в процессе пластической деформации.

#### **2.4. Результаты экспериментальных исследований энергетического состояния ПС, упрочнённого в процессе ППВ**

В качестве исходной температуры металла образцов принята температура, равная  $T_{исх} = 293$  °К. Значение молярной теплоемкости для железа  $C = 0,02514$  кДж/К·моль. Используя зависимость (2.15) получены следующие значения предельной энергии, накапливаемой в локальном объёме поверхности металла исследуемых образцов, представленные в табл. 2.5.

Таблица 2.5

## Величина предельной энергии исследуемых материалов

| Материал образцов | $T_{пл}$ ,<br>К | $\Delta H$ ,<br>кДж /моль |
|-------------------|-----------------|---------------------------|
| Сталь 20          | 1797            | 37,685                    |
| Сталь 35          | 1787            | 37,433                    |
| Сталь 45          | 1779            | 37,232                    |

В таблицах 2.6–2.8 и на рисунках 2.17–2.25 представлены результаты проведенных исследований, в ходе которых получены следующие экспериментальные данные, необходимые для последующих расчетов.

Таблица 2.6

## Результаты пластической деформации образцов из стали 35

| Номер образца | N,<br>кол-во ударов | A,<br>работа удара,<br>Дж | HV <sub>ср</sub> ,<br>твёрдость,<br>ГПа | T <sub>кр</sub> ,<br>конечная температура,<br>°С | $\Delta T_{ср}$ ,<br>разница температур,<br>°С | $\Delta T_{ср}$ ,<br>разница температур,<br>К |
|---------------|---------------------|---------------------------|---|--|--|---|
| 1             | 1                   | 30,75                     | 2,025                                   | 23,8   | 0,2  | 273,35  |
| 2             | 3                   | 37,95                     | 2,351                                   | 24,3   | 0,5  | 273,65  |
| 3             | 5                   | 45,15                     | 2,519                                   | 24,7   | 0,9  | 274,05  |
| 4             | 7                   | 52,35                     | 2,758                                   | 25   | 1,2  | 274,35  |
| 5             | 9                   | 59,55                     | 2,971                                   | 25,5   | 1,7  | 274,85  |
| 6             | 11                  | 66,75                     | 3,012                                   | 25,95  | 2,15   | 275,3   |
| 7             | 13                  | 74,00                     | 3,09                                    | 26,4   | 2,6  | 275,75  |
| 8             | 15                  | 81,20                     | 3,087                                   | 26,9   | 3,1  | 276,25  |
| 9             | 17                  | 88,40                     | 3,072                                   | 27,3   | 3,5  | 276,65  |
| 10            | 19                  | 95,60                     | 3,055                                   | 27,7   | 3,9  | 277,05  |
| 11            | 21                  | 102,80                    | 3,044                                   | 28   | 4,2  | 277,35  |
| 12            | 23                  | 110,00                    | 3,021                                   | 28,4   | 4,6  | 277,75  |
| 13            | 25                  | 117,20                    | 3,09                                    | 28,9   | 5,1  | 278,25  |
| 14            | 27                  | 124,40                    | 3,042                                   | 29,2   | 5,4  | 278,55  |
| 15            | 29                  | 131,60                    | 3,082                                   | 29,6   | 5,8  | 278,95  |
| 16            | 31                  | 138,80                    | 3,091                                   | 29,9   | 6,1  | 279,25  |
| 17            | 33                  | 146,00                    | 3,092                                   | 30,3   | 6,5  | 279,65  |
| 18            | 35                  | 153,20                    | 3,078                                   | 30,7   | 6,9  | 280,05  |
| 19            | 37                  | 160,40                    | 3,076                                   | 31,1   | 7,3  | 280,45  |
| 20            | 39                  | 167,60                    | 3,068                                   | 31,5   | 7,7  | 280,85  |
| 21            | 41                  | 174,80                    | 3,067                                   | 31,9   | 8,1  | 281,25  |

|    |    |        |       |      |      |        |
|----|----|--------|-------|------|------|--------|
| 22 | 43 | 182,00 | 3,078 | 32,3 | 8,5  | 281,65 |
| 23 | 45 | 189,20 | 3,082 | 32,7 | 8,9  | 282,05 |
| 24 | 47 | 196,40 | 3,081 | 33,1 | 9,3  | 282,45 |
| 25 | 49 | 203,60 | 3,087 | 33,5 | 9,7  | 282,85 |
| 26 | 51 | 210,80 | 3,084 | 33,9 | 10,1 | 283,25 |
| 27 | 53 | 218,00 | 3,086 | 34,3 | 10,5 | 283,65 |
| 28 | 55 | 225,20 | 3,087 | 34,7 | 10,9 | 284,05 |
| 29 | 57 | 232,40 | 3,083 | 35,1 | 11,3 | 284,45 |
| 30 | 59 | 239,60 | 3,078 | 35,5 | 11,7 | 284,85 |
| 31 | 61 | 246,80 | 3,079 | 35,9 | 12,1 | 285,25 |
| 32 | 63 | 254,00 | 3,081 | 36,3 | 12,5 | 285,65 |
| 33 | 65 | 261,20 | 3,082 | 36,7 | 12,9 | 286,05 |
| 34 | 67 | 268,40 | 3,074 | 37,1 | 13,3 | 286,45 |
| 35 | 69 | 275,60 | 3,072 | 37,5 | 13,7 | 286,85 |
| 36 | 71 | 282,80 | 3,082 | 37,9 | 14,1 | 287,25 |
| 37 | 73 | 290,00 | 3,084 | 38,3 | 14,5 | 287,65 |
| 38 | 75 | 297,20 | 3,081 | 38,7 | 14,9 | 288,05 |
| 39 | 77 | 304,40 | 3,082 | 39,1 | 15,3 | 288,45 |
| 40 | 79 | 311,60 | 3,089 | 39,5 | 15,7 | 288,85 |
| 41 | 81 | 318,80 | 3,065 | 39,9 | 16,1 | 289,25 |
| 42 | 83 | 326,00 | 3,085 | 40,3 | 16,5 | 289,65 |
| 43 | 85 | 333,20 | 3,052 | 40,7 | 16,9 | 290,05 |
| 44 | 87 | 340,40 | 3,062 | 41,1 | 17,3 | 290,45 |
| 45 | 89 | 347,60 | 3,062 | 41,5 | 17,7 | 290,85 |

Таблица 2.7

Результаты пластической деформации образцов из стали 20

| Номер образца | N, кол-во ударов | A, работа удара, Дж | HV <sub>ср</sub> , твёрдость, ГПа | T <sub>кр</sub> , конечная температура, °С | ΔT <sub>ср</sub> , разница температур, °С | ΔT <sub>ср</sub> , разница температур, К |
|---------------|------------------|---------------------|-----------------------------------|--|---|--|
| 1             | 1                | 30,75               | 2,351                             | 23,4                                       | 0,2                                       | 273,35                                   |
| 2             | 3                | 37,95               | 2,532                             | 24,3                                       | 0,5                                       | 273,65                                   |
| 3             | 5                | 45,15               | 2,612                             | 24,7                                       | 0,9                                       | 274,05                                   |
| 4             | 7                | 52,35               | 2,755                             | 25   | 1,2                                       | 274,35                                   |
| 5             | 9                | 59,55               | 2,91                              | 25,5                                       | 1,7                                       | 274,85                                   |
| 6             | 11               | 66,75               | 2,855                             | 25,95                                      | 2,15                                      | 275,3                                    |
| 7             | 13               | 74,00               | 2,85                              | 26,4                                       | 2,6                                       | 275,75                                   |
| 8             | 15               | 81,20               | 2,845                             | 26,9                                       | 3,1                                       | 276,25                                   |
| 9             | 17               | 88,40               | 2,846                             | 27,3                                       | 3,5                                       | 276,65                                   |
| 10            | 19               | 95,60               | 2,836                             | 27,7                                       | 3,9                                       | 277,05                                   |

|    |    |        |       |      |      |        |
|----|----|--------|-------|------|------|--------|
| 11 | 21 | 102,80 | 2,832 | 28   | 4,2  | 277,35 |
| 12 | 23 | 110,00 | 2,829 | 28,4 | 4,6  | 277,75 |
| 13 | 25 | 117,20 | 2,791 | 28,9 | 5,1  | 278,25 |
| 14 | 27 | 124,40 | 2,812 | 29,2 | 5,4  | 278,55 |
| 15 | 29 | 131,60 | 2,822 | 29,6 | 5,8  | 278,95 |
| 16 | 31 | 138,80 | 2,844 | 29,9 | 6,1  | 279,25 |
| 17 | 33 | 146,00 | 2,855 | 30,3 | 6,5  | 279,65 |
| 18 | 35 | 153,20 | 2,881 | 30,7 | 6,9  | 280,05 |
| 19 | 37 | 160,40 | 2,889 | 31,1 | 7,3  | 280,45 |
| 20 | 39 | 167,60 | 2,881 | 31,5 | 7,7  | 280,85 |
| 21 | 41 | 174,80 | 2,844 | 31,9 | 8,1  | 281,25 |
| 22 | 43 | 182,00 | 2,799 | 32,3 | 8,5  | 281,65 |
| 23 | 45 | 189,20 | 2,792 | 32,7 | 8,9  | 282,05 |
| 24 | 47 | 196,40 | 2,811 | 33,1 | 9,3  | 282,45 |
| 25 | 49 | 203,60 | 2,822 | 33,5 | 9,7  | 282,85 |
| 26 | 51 | 210,80 | 2,852 | 33,9 | 10,1 | 283,25 |
| 27 | 53 | 218,00 | 2,851 | 34,3 | 10,5 | 283,65 |
| 28 | 55 | 225,20 | 2,859 | 34,7 | 10,9 | 284,05 |
| 29 | 57 | 232,40 | 2,834 | 35,1 | 11,3 | 284,45 |
| 30 | 59 | 239,60 | 2,855 | 35,5 | 11,7 | 284,85 |
| 31 | 61 | 246,80 | 2,851 | 35,9 | 12,1 | 285,44 |
| 32 | 63 | 254,00 | 2,812 | 36,4 | 12,5 | 285,87 |
| 33 | 65 | 261,20 | 2,832 | 36,7 | 12,9 | 286,05 |
| 34 | 67 | 268,40 | 2,832 | 37,1 | 13,3 | 286,45 |
| 35 | 69 | 275,60 | 2,842 | 37,5 | 13,7 | 286,85 |
| 36 | 71 | 282,80 | 2,866 | 37,9 | 14,1 | 287,25 |
| 37 | 73 | 290,00 | 2,878 | 38,3 | 14,5 | 287,65 |
| 38 | 75 | 297,20 | 2,881 | 38,7 | 14,9 | 288,05 |
| 39 | 77 | 304,40 | 2,877 | 39,1 | 15,3 | 288,45 |
| 40 | 79 | 311,60 | 2,888 | 39,5 | 15,7 | 288,85 |
| 41 | 81 | 318,80 | 2,871 | 39,9 | 16,1 | 289,25 |
| 42 | 83 | 326,00 | 2,863 | 40,3 | 16,5 | 289,65 |
| 43 | 85 | 333,20 | 2,862 | 40,7 | 16,9 | 290,05 |
| 44 | 87 | 340,40 | 2,869 | 41,1 | 17,3 | 290,45 |
| 45 | 89 | 347,60 | 2,871 | 41,5 | 17,7 | 290,85 |

Таблица 2.8

Результаты пластической деформации образцов из стали 45

| Номер образца | N, кол-во ударов | A, | HV <sub>ср</sub> , твёрдость, ГПа | T <sub>ксп</sub> , | ΔT <sub>ср</sub> , разница | ΔT <sub>ср</sub> , разница |
|---------------|------------------|----|-----------------------------------|--------------------|----------------------------|----------------------------|
|---------------|------------------|----|-----------------------------------|--------------------|----------------------------|----------------------------|

|    |    | работа удара, Дж |       | конечная температура, °С | температур, °С | температур, К |
|----|----|------------------|-------|--------------------------|----------------|---------------|
| 1  | 1  | 30,75            | 2,525 | 23,2                     | 0,2            | 273,35        |
| 2  | 3  | 37,95            | 2,651 | 24,3                     | 0,5            | 273,65        |
| 3  | 5  | 45,15            | 2,819 | 24,7                     | 0,9            | 274,05        |
| 4  | 7  | 52,35            | 3,158 | 25                       | 1,2            | 274,35        |
| 5  | 9  | 59,55            | 3,522 | 25,5                     | 1,7            | 274,85        |
| 6  | 11 | 66,75            | 3,721 | 25,95                    | 2,15           | 275,3         |
| 7  | 13 | 74,00            | 3,843 | 26,4                     | 2,6            | 275,75        |
| 8  | 15 | 81,20            | 3,832 | 26,9                     | 3,1            | 276,25        |
| 9  | 17 | 88,40            | 3,833 | 27,3                     | 3,5            | 276,65        |
| 10 | 19 | 95,60            | 3,825 | 27,7                     | 3,9            | 277,05        |
| 11 | 21 | 102,80           | 3,799 | 28                       | 4,2            | 277,35        |
| 12 | 23 | 110,00           | 3,782 | 28,4                     | 4,6            | 277,75        |
| 13 | 25 | 117,20           | 3,822 | 28,9                     | 5,1            | 278,25        |
| 14 | 27 | 124,40           | 3,832 | 29,2                     | 5,4            | 278,55        |
| 15 | 29 | 131,60           | 3,838 | 29,6                     | 5,8            | 278,95        |
| 16 | 31 | 138,80           | 3,821 | 29,9                     | 6,1            | 279,25        |
| 17 | 33 | 146,00           | 3,826 | 30,3                     | 6,5            | 279,65        |
| 18 | 35 | 153,20           | 3,811 | 30,7                     | 6,9            | 280,05        |
| 19 | 37 | 160,40           | 3,789 | 31,1                     | 7,3            | 280,45        |
| 20 | 39 | 167,60           | 3,798 | 31,5                     | 7,7            | 280,85        |
| 21 | 41 | 174,80           | 3,779 | 31,9                     | 8,1            | 281,25        |
| 22 | 43 | 182,00           | 3,789 | 32,3                     | 8,5            | 281,65        |
| 23 | 45 | 189,20           | 3,811 | 32,7                     | 8,9            | 282,05        |
| 24 | 47 | 196,40           | 3,811 | 33,1                     | 9,3            | 282,45        |
| 25 | 49 | 203,60           | 3,822 | 33,5                     | 9,7            | 282,85        |
| 26 | 51 | 210,80           | 3,832 | 33,9                     | 10,1           | 283,25        |
| 27 | 53 | 218,00           | 3,831 | 34,3                     | 10,5           | 283,65        |
| 28 | 55 | 225,20           | 3,841 | 34,7                     | 10,9           | 284,05        |
| 29 | 57 | 232,40           | 3,841 | 35,1                     | 11,3           | 284,45        |
| 30 | 59 | 239,60           | 3,829 | 35,5                     | 11,7           | 284,85        |
| 31 | 61 | 246,80           | 3,829 | 36,1                     | 12,2           | 285,54        |
| 32 | 63 | 254,00           | 3,817 | 36,4                     | 12,5           | 285,87        |
| 33 | 65 | 261,20           | 3,814 | 36,7                     | 12,9           | 286,05        |
| 34 | 67 | 268,40           | 3,813 | 37,1                     | 13,3           | 286,45        |
| 35 | 69 | 275,60           | 3,842 | 37,5                     | 13,7           | 286,85        |
| 36 | 71 | 282,80           | 3,832 | 37,9                     | 14,1           | 287,25        |
| 37 | 73 | 290,00           | 3,799 | 38,3                     | 14,5           | 287,65        |
| 38 | 75 | 297,20           | 3,801 | 38,7                     | 14,9           | 288,05        |
| 39 | 77 | 304,40           | 3,812 | 39,1                     | 15,3           | 288,45        |

|    |    |        |       |      |      |        |
|----|----|--------|-------|------|------|--------|
| 40 | 79 | 311,60 | 3,817 | 39,5 | 15,7 | 288,85 |
| 41 | 81 | 318,80 | 3,838 | 39,9 | 16,1 | 289,25 |
| 42 | 83 | 326,00 | 3,833 | 40,3 | 16,5 | 289,65 |
| 43 | 85 | 333,20 | 3,839 | 40,7 | 16,9 | 290,05 |
| 44 | 87 | 340,40 | 3,837 | 41,1 | 17,3 | 290,45 |
| 45 | 89 | 347,60 | 3,828 | 41,5 | 17,7 | 290,85 |

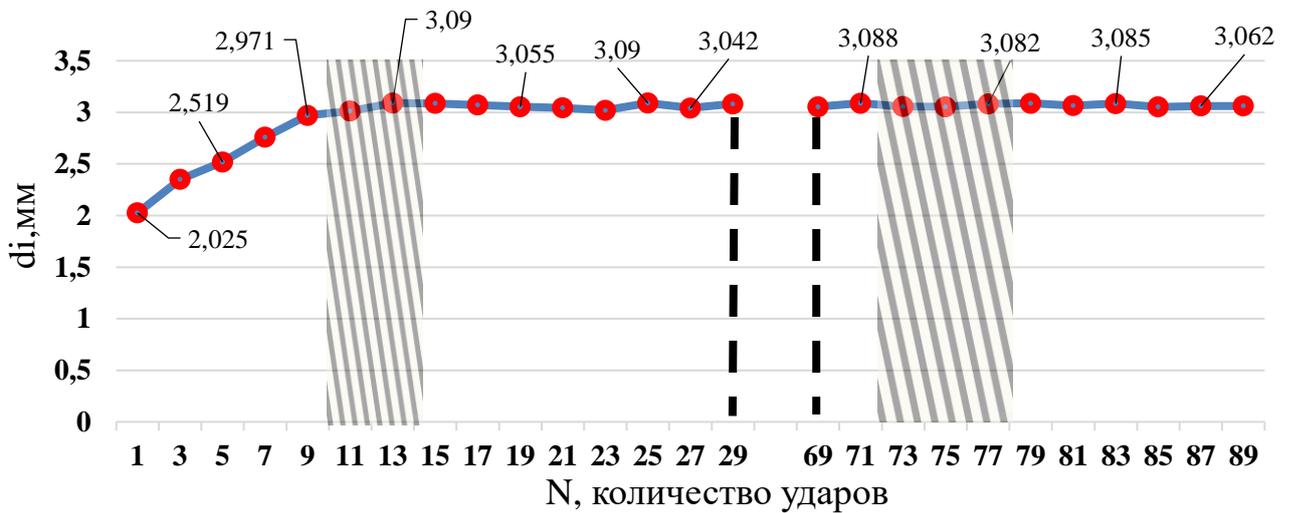


Рис. 2.17. Изменение пластически деформированной зоны на образцах из стали 35 в зависимости от количества актов ударно-силового воздействия

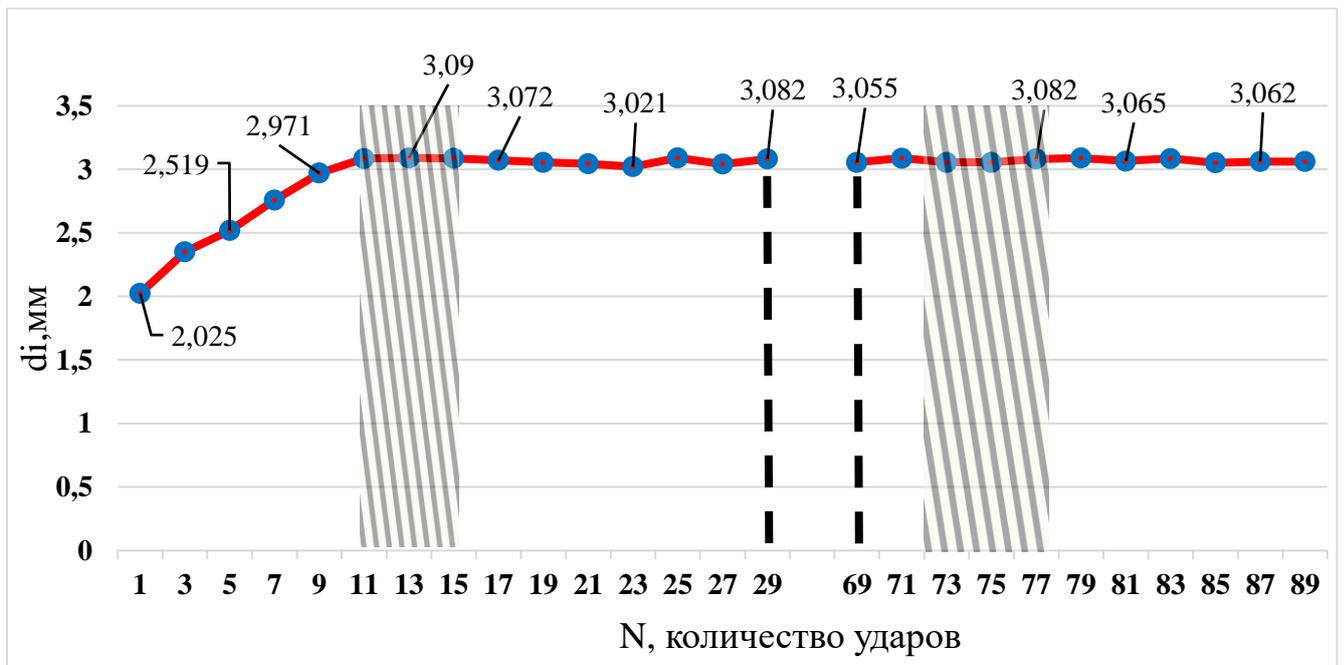


Рис. 2.18. Изменение пластически деформированной зоны в зависимости от количества актов ударно-силового воздействия (материал образцов сталь 20)

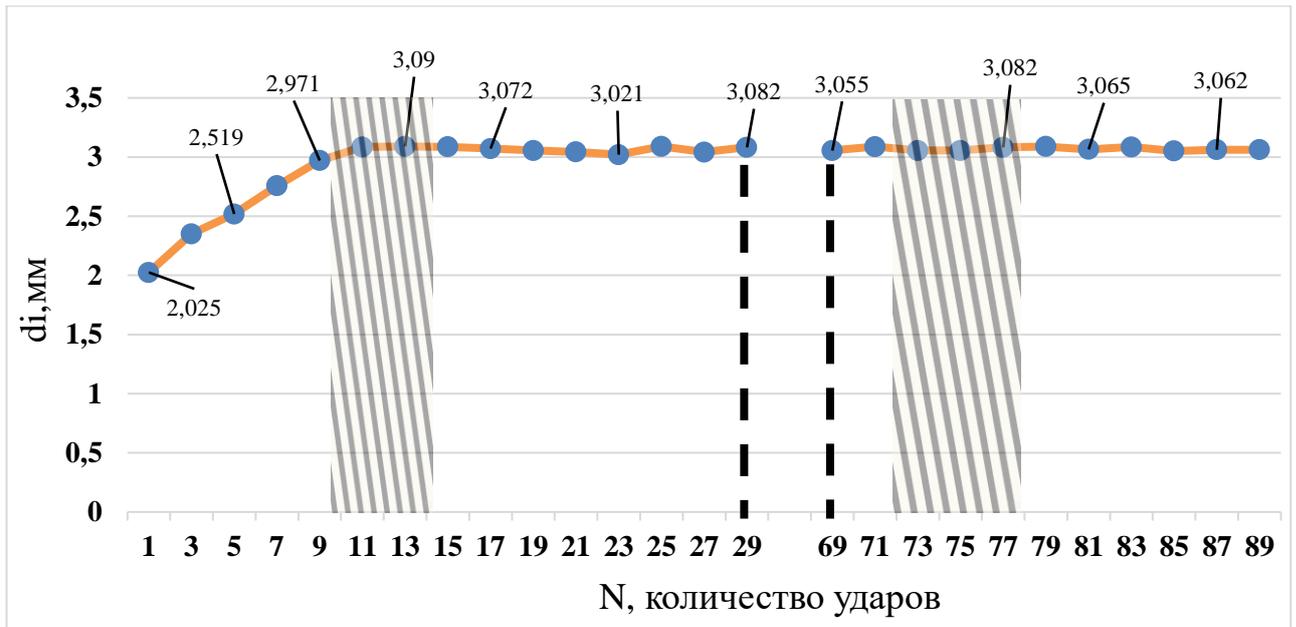


Рис. 2.19. Изменение пластически деформированной зоны в зависимости от количества актов ударно-силового воздействия (материал образцов сталь 45)

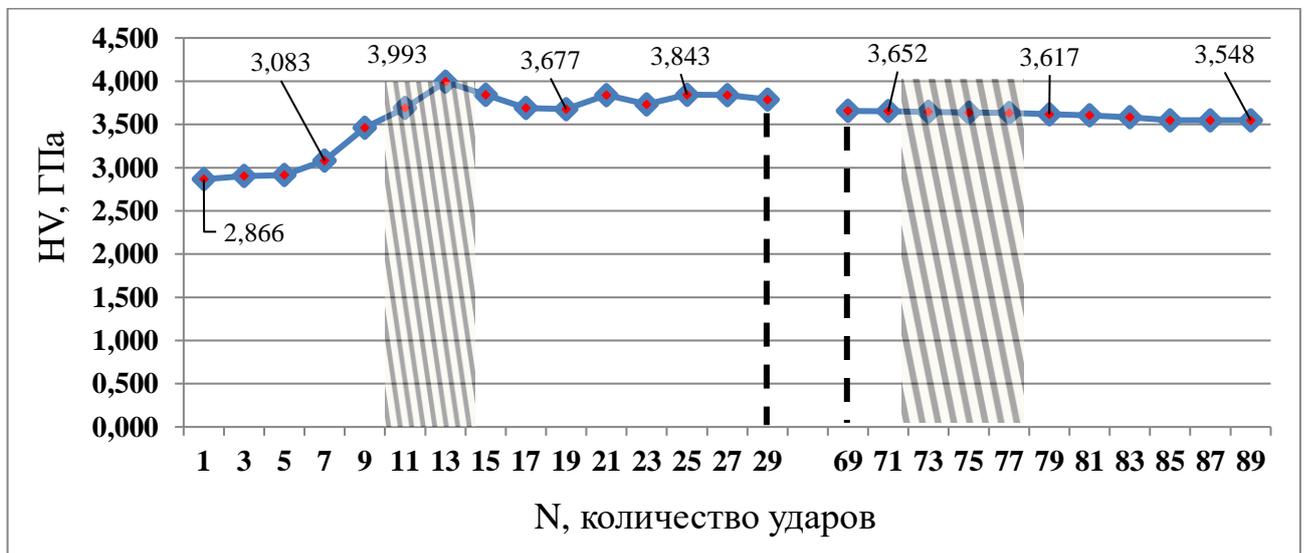


Рис. 2.20. Изменение микротвёрдости зоны пластически деформированной зоны в зависимости от количества актов ударно-силового воздействия (материал образцов сталь 35)

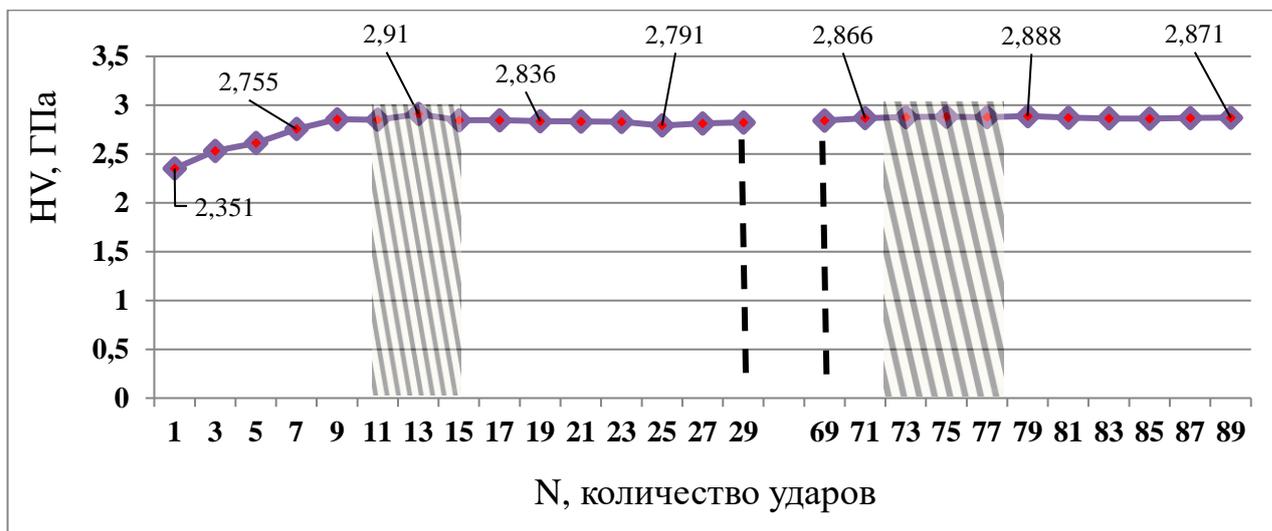


Рис. 2.21. Изменение микротвёрдости зоны пластически деформированной зоны в зависимости от количества актов ударно-силового воздействия (материал образцов сталь 20)

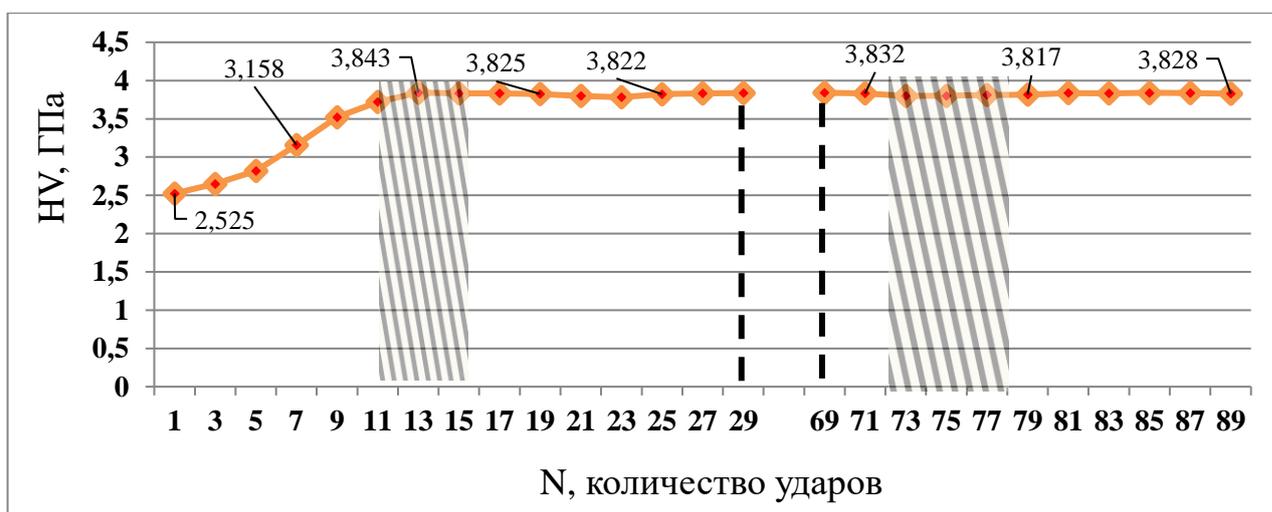


Рис. 2.22. Изменение микротвёрдости зоны пластически деформированной зоны в зависимости от количества актов ударно-силового воздействия (материал образцов сталь 45)

Экспериментальные данные позволили установить следующее. Рост размеров пластических отпечатков и твёрдости их поверхности наблюдается при достижении актов ударно-силового воздействия на уровне 10–14, при дальнейших ударах эти параметры отпечатков стабилизируются.

Однако при 72–77 ударах, как показали исследования, проведённые на микроскопе УИМ-21, зафиксировано появление микротрещин на поверхности пластических отпечатков, свидетельствующее о её разрушении (рис. 2.23).



Рис. 2.23. Микротрещина на поверхности образца

Используя экспериментальные данные, приведённые в табл. 2.7–2.9, произведены расчеты: работы и теплового эффекта пластической деформации; энергии, накопленной в локальном объёме поверхности образца, доля теплового эффекта, затрачиваемого на изменение энергии локального объема поверхностного слоя и доля энергии, накапливаемой в локальном объеме поверхностного слоя в результате механического воздействия (табл. 2.9–2.11).

Таблица 2.9

Результаты расчёта, накапливаемой в локальном объёме поверхности образца из стали 20

| Номер образца | N, кол-во ударов | $A_i$ , работа пластической деформации, кДж/моль | Q, тепловой эффект, кДж/моль | $E_u$ , внутренняя энергия, кДж/моль | $E_t$ , доля теплового эффекта в $E_u$ , кДж/моль | $E_m$ , доля механического воздействия в $E_u$ , кДж/моль |
|---------------|------------------|--|------------------------------|--------------------------------------|---|---|
| 1             | 1                | 30,75  | 8,65                         | 22,475                               | 1,72  | 20,755  |
| 2             | 3                | 37,95  | 7,89                         | 30,830                               | 3,87  | 26,96   |

|    |    |        |       |        |        |        |
|----|----|--------|-------|--------|--------|--------|
| 3  | 5  | 45,15  | 9,88  | 28,771 | 5,64   | 23,131 |
| 4  | 7  | 52,35  | 12,10 | 30,551 | 8,62   | 21,931 |
| 5  | 9  | 59,55  | 13,20 | 33,451 | 8,86   | 24,591 |
| 6  | 11 | 66,75  | 15,10 | 35,551 | 7,91   | 27,641 |
| 7  | 13 | 74,00  | 17,22 | 36,754 | 10,84  | 25,914 |
| 8  | 15 | 81,20  | 18,42 | 40,21  | 12,61  | 27,6   |
| 9  | 17 | 88,40  | 19,62 | 43,12  | 15,33  | 27,79  |
| 10 | 19 | 95,60  | 20,82 | 45,32  | 17,06  | 28,26  |
| 11 | 21 | 102,80 | 22,02 | 48,64  | 20,71  | 27,93  |
| 12 | 23 | 110,00 | 23,22 | 51,46  | 23,43  | 28,03  |
| 13 | 25 | 117,20 | 24,42 | 36,544 | 25,66  | 10,884 |
| 14 | 27 | 124,40 | 25,62 | 57,11  | 28,41  | 28,7   |
| 15 | 29 | 131,60 | 26,82 | 59,93  | 31,27  | 28,66  |
| 16 | 31 | 138,80 | 28,02 | 62,13  | 33,6   | 28,53  |
| 17 | 33 | 146,00 | 29,22 | 65,43  | 36,18  | 29,25  |
| 18 | 35 | 153,20 | 30,42 | 68,53  | 38,17  | 30,36  |
| 19 | 37 | 160,40 | 31,62 | 71,63  | 41,77  | 29,86  |
| 20 | 39 | 167,60 | 32,82 | 73,33  | 44,42  | 28,91  |
| 21 | 41 | 174,80 | 34,02 | 76,63  | 47,27  | 29,36  |
| 22 | 43 | 182,00 | 35,22 | 79,83  | 50,03  | 29,8   |
| 23 | 45 | 189,20 | 36,42 | 82,93  | 53,04  | 29,89  |
| 24 | 47 | 196,40 | 37,62 | 85,03  | 55,77  | 29,26  |
| 25 | 49 | 203,60 | 38,82 | 87,23  | 57,93  | 29,3   |
| 26 | 51 | 210,80 | 40,02 | 90,13  | 60,96  | 29,17  |
| 27 | 53 | 218,00 | 41,22 | 93,13  | 63,67  | 29,46  |
| 28 | 55 | 225,20 | 42,42 | 96,53  | 66,43  | 30,1   |
| 29 | 57 | 232,40 | 43,62 | 99,73  | 68,91  | 30,82  |
| 30 | 59 | 239,60 | 44,82 | 100,83 | 71,64  | 29,19  |
| 31 | 61 | 246,80 | 46,02 | 104,13 | 74,31  | 29,82  |
| 32 | 63 | 254,00 | 47,22 | 107,23 | 77,04  | 30,19  |
| 33 | 65 | 261,20 | 48,42 | 109,23 | 79,76  | 29,47  |
| 34 | 67 | 268,40 | 49,62 | 109,03 | 82,5   | 26,53  |
| 35 | 69 | 275,60 | 50,82 | 114,83 | 85,38  | 29,45  |
| 36 | 71 | 282,80 | 52,02 | 117,63 | 88,15  | 29,48  |
| 37 | 73 | 290,00 | 53,22 | 122,43 | 91,82  | 30,61  |
| 38 | 75 | 297,20 | 54,42 | 125,23 | 93,55  | 31,68  |
| 39 | 77 | 304,40 | 55,62 | 128,03 | 96,38  | 31,65  |
| 40 | 79 | 311,60 | 56,82 | 130,83 | 99,12  | 31,71  |
| 41 | 81 | 318,80 | 58,02 | 132,63 | 101,84 | 30,79  |
| 42 | 83 | 326,00 | 59,22 | 135,43 | 104,66 | 30,77  |
| 43 | 85 | 333,20 | 60,42 | 137,23 | 106,84 | 30,39  |
| 44 | 87 | 340,40 | 61,62 | 140,13 | 108,64 | 31,49  |
| 45 | 89 | 347,60 | 62,82 | 143,83 | 111,44 | 32,39  |

Таблица 2.10

Результаты расчёта энергии, накапливаемой в пластически деформированном локальном объёме поверхности образца из стали 35

| Номер образца | N, кол-во ударов | $A_i$ , работа пластической деформации, кДж/моль | Q, тепловой эффект, кДж/моль | $E_u$ , внутренняя энергия, кДж/моль | $E_t$ , доля теплового эффекта в $E_u$ , кДж/моль | $E_m$ , доля механического воздействия в $E_u$ , кДж/моль |
|---------------|------------------|--|------------------------------|--------------------------------------|---|---|
| 1             | 1                | 30,75  | 8,65                         | 22,00                                | 1,65  | 20,345  |
| 2             | 3                | 37,95  | 7,89                         | 26,76                                | 4,87  | 21,888  |
| 3             | 5                | 45,15  | 9,88                         | 28,77                                | 6,64  | 22,129  |
| 4             | 7                | 52,35  | 12,10                        | 30,55                                | 6,62  | 23,934  |
| 5             | 9                | 59,55  | 13,20                        | 33,45                                | 8,86  | 24,588  |
| 6             | 11               | 66,75  | 15,10                        | 35,55                                | 7,91  | 27,640  |
| 7             | 13               | 74,00  | 17,22                        | 37,43                                | 9,84  | 27,598  |
| 8             | 15               | 81,20  | 18,42                        | 40,23                                | 12,61   | 27,626  |
| 9             | 17               | 88,40  | 19,62                        | 43,03                                | 15,33   | 27,704  |
| 10            | 19               | 95,60  | 20,82                        | 45,83                                | 18,06   | 27,775  |
| 11            | 21               | 102,80   | 22,02                        | 48,63                                | 20,71   | 27,924  |
| 12            | 23               | 110,00   | 23,22                        | 51,43                                | 23,43   | 28,002  |
| 13            | 25               | 117,20   | 24,42                        | 54,23                                | 25,87   | 28,365  |
| 14            | 27               | 124,40   | 25,62                        | 57,03                                | 28,41   | 28,627  |
| 15            | 29               | 131,60   | 26,82                        | 59,83                                | 31,27   | 28,563  |
| 16            | 31               | 138,80   | 28,02                        | 62,63                                | 33,60   | 29,032  |
| 17            | 33               | 146,00   | 29,22                        | 65,43                                | 36,18   | 29,252  |
| 18            | 35               | 153,20   | 30,42                        | 68,23                                | 39,17   | 29,060  |
| 19            | 37               | 160,40   | 31,62                        | 71,03                                | 41,77   | 29,266  |
| 20            | 39               | 167,60   | 32,82                        | 73,83                                | 44,42   | 29,408  |
| 21            | 41               | 174,80   | 34,02                        | 76,63                                | 47,27   | 29,359  |
| 22            | 43               | 182,00   | 35,22                        | 79,43                                | 50,03   | 29,401  |
| 23            | 45               | 189,20   | 36,42                        | 82,23                                | 53,04   | 29,188  |
| 24            | 47               | 196,40   | 37,62                        | 85,03                                | 55,77   | 29,266  |
| 25            | 49               | 203,60   | 38,82                        | 87,83                                | 57,93   | 29,898  |
| 26            | 51               | 210,80   | 40,02                        | 90,63                                | 60,96   | 29,678  |
| 27            | 53               | 218,00   | 41,22                        | 93,43                                | 63,67   | 29,763  |
| 28            | 55               | 225,20   | 42,42                        | 96,23                                | 66,43   | 29,806  |
| 29            | 57               | 232,40   | 43,62                        | 99,03                                | 68,91   | 30,125  |
| 30            | 59               | 239,60   | 44,82                        | 101,83                               | 71,64   | 30,189  |

|    |    |        |       |        |        |        |
|----|----|--------|-------|--------|--------|--------|
| 31 | 61 | 246,80 | 46,02 | 104,63 | 74,31  | 30,324 |
| 32 | 63 | 254,00 | 47,22 | 107,43 | 77,04  | 30,395 |
| 33 | 65 | 261,20 | 48,42 | 110,23 | 79,76  | 30,473 |
| 34 | 67 | 268,40 | 49,62 | 113,03 | 82,50  | 30,537 |
| 35 | 69 | 275,60 | 50,82 | 115,83 | 85,38  | 30,452 |
| 36 | 71 | 282,80 | 52,02 | 118,63 | 88,15  | 30,487 |
| 37 | 73 | 290,00 | 53,22 | 121,43 | 90,82  | 30,615 |
| 38 | 75 | 297,20 | 54,42 | 124,23 | 93,55  | 30,686 |
| 39 | 77 | 304,40 | 55,62 | 127,03 | 96,38  | 30,658 |
| 40 | 79 | 311,60 | 56,82 | 129,83 | 99,12  | 30,715 |
| 41 | 81 | 318,80 | 58,02 | 132,63 | 101,84 | 30,793 |
| 42 | 83 | 326,00 | 59,22 | 135,43 | 104,04 | 31,396 |
| 43 | 85 | 333,20 | 60,42 | 138,23 | 106,84 | 31,396 |
| 44 | 87 | 340,40 | 61,62 | 141,03 | 109,64 | 31,396 |
| 45 | 89 | 347,60 | 62,82 | 143,83 | 112,44 | 31,396 |

Таблица 2.11

Результаты расчёта энергии, накапливаемой в пластически деформированном локальном объёме поверхности образца из стали 45

| Номер образца | N, кол-во ударов | A <sub>i</sub> , работа пластической деформации, кДж/моль | Q, тепловой эффект, кДж/моль | E <sub>y</sub> , внутренняя энергия, кДж/моль | E <sub>t</sub> , доля теплового эффекта в E <sub>y</sub> , кДж/моль | E <sub>m</sub> , доля механического воздействия в E <sub>y</sub> , кДж/моль |
|---------------|------------------|---|------------------------------|---|---|---|
| 1             | 1                | 30,75   | 8,65                         | 29,450  | 1,32  | 28,13   |
| 2             | 3                | 37,95   | 7,89                         | 31,574  | 5,47  | 26,104  |
| 3             | 5                | 45,15   | 9,88                         | 33,108  | 6,64  | 26,468  |
| 4             | 7                | 52,35   | 12,10                        | 35,374  | 7,62  | 27,754  |
| 5             | 9                | 59,55   | 13,20                        | 38,747  | 9,86  | 28,887  |
| 6             | 11               | 66,75   | 15,10                        | 40,924  | 8,91  | 32,014  |
| 7             | 13               | 74,00   | 17,22                        | 41,380  | 10,84   | 30,54   |
| 8             | 15               | 81,20   | 18,42                        | 43,444  | 11,61   | 31,834  |
| 9             | 17               | 88,40   | 19,62                        | 45,33   | 16,23   | 29,1  |
| 10            | 19               | 95,60   | 20,82                        | 46,47   | 19,06   | 27,41   |
| 11            | 21               | 102,80  | 22,02                        | 48,11   | 21,71   | 26,4  |
| 12            | 23               | 110,00  | 23,22                        | 51,22   | 23,43   | 27,79   |
| 13            | 25               | 117,20  | 24,42                        | 54,22   | 25,87   | 28,35   |
| 14            | 27               | 124,40  | 25,62                        | 56,03   | 28,41   | 27,62   |

|    |    |        |       |        |        |       |
|----|----|--------|-------|--------|--------|-------|
| 15 | 29 | 131,60 | 26,82 | 59,83  | 30,27  | 29,56 |
| 16 | 31 | 138,80 | 28,02 | 62,63  | 33,60  | 29,03 |
| 17 | 33 | 146,00 | 29,22 | 65,43  | 36,18  | 29,25 |
| 18 | 35 | 153,20 | 30,42 | 68,23  | 39,17  | 29,06 |
| 19 | 37 | 160,40 | 31,62 | 71,03  | 42,77  | 28,26 |
| 20 | 39 | 167,60 | 32,82 | 73,83  | 44,42  | 29,41 |
| 21 | 41 | 174,80 | 34,02 | 76,63  | 48,27  | 28,36 |
| 22 | 43 | 182,00 | 35,22 | 79,43  | 50,03  | 29,4  |
| 23 | 45 | 189,20 | 36,42 | 82,23  | 53,04  | 29,19 |
| 24 | 47 | 196,40 | 37,62 | 85,03  | 54,77  | 30,26 |
| 25 | 49 | 203,60 | 38,82 | 87,83  | 57,93  | 29,9  |
| 26 | 51 | 210,80 | 40,02 | 90,63  | 60,96  | 29,67 |
| 27 | 53 | 218,00 | 41,22 | 93,43  | 63,67  | 29,76 |
| 28 | 55 | 225,20 | 42,42 | 96,23  | 65,43  | 30,8  |
| 29 | 57 | 232,40 | 43,62 | 98,03  | 68,91  | 29,12 |
| 30 | 59 | 239,60 | 44,82 | 101,83 | 72,24  | 29,59 |
| 31 | 61 | 246,80 | 46,02 | 104,63 | 74,31  | 30,32 |
| 32 | 63 | 254,00 | 47,22 | 107,43 | 78,04  | 29,39 |
| 33 | 65 | 261,20 | 48,42 | 110,53 | 80,76  | 29,77 |
| 34 | 67 | 268,40 | 49,62 | 112,03 | 82,50  | 29,53 |
| 35 | 69 | 275,60 | 50,82 | 114,83 | 85,38  | 29,45 |
| 36 | 71 | 282,80 | 52,02 | 117,63 | 88,15  | 29,48 |
| 37 | 73 | 290,00 | 53,22 | 120,43 | 90,82  | 29,61 |
| 38 | 75 | 297,20 | 54,42 | 123,23 | 92,55  | 30,68 |
| 39 | 77 | 304,40 | 55,62 | 126,03 | 96,38  | 29,65 |
| 40 | 79 | 311,60 | 56,82 | 129,83 | 99,12  | 30,71 |
| 41 | 81 | 318,80 | 58,02 | 132,63 | 101,84 | 30,79 |
| 42 | 83 | 326,00 | 59,22 | 135,43 | 104,04 | 31,39 |
| 43 | 85 | 333,20 | 60,42 | 138,23 | 106,84 | 31,39 |
| 44 | 87 | 340,40 | 61,62 | 141,03 | 111,57 | 29,46 |
| 45 | 89 | 347,60 | 62,82 | 143,83 | 114,44 | 29,39 |

Данные, полученные экспериментально-расчетным путем, были основой для построения следующих зависимостей: график изменения величины энергии, накапливаемой в локальном объёме поверхности, от количества актов ударно-силового воздействия на него и её составляющих (механической и тепловой) (рис. 2.24); график изменения работы и теплового эффекта от количества актов ударно-силового воздействия (рис. 2.25).

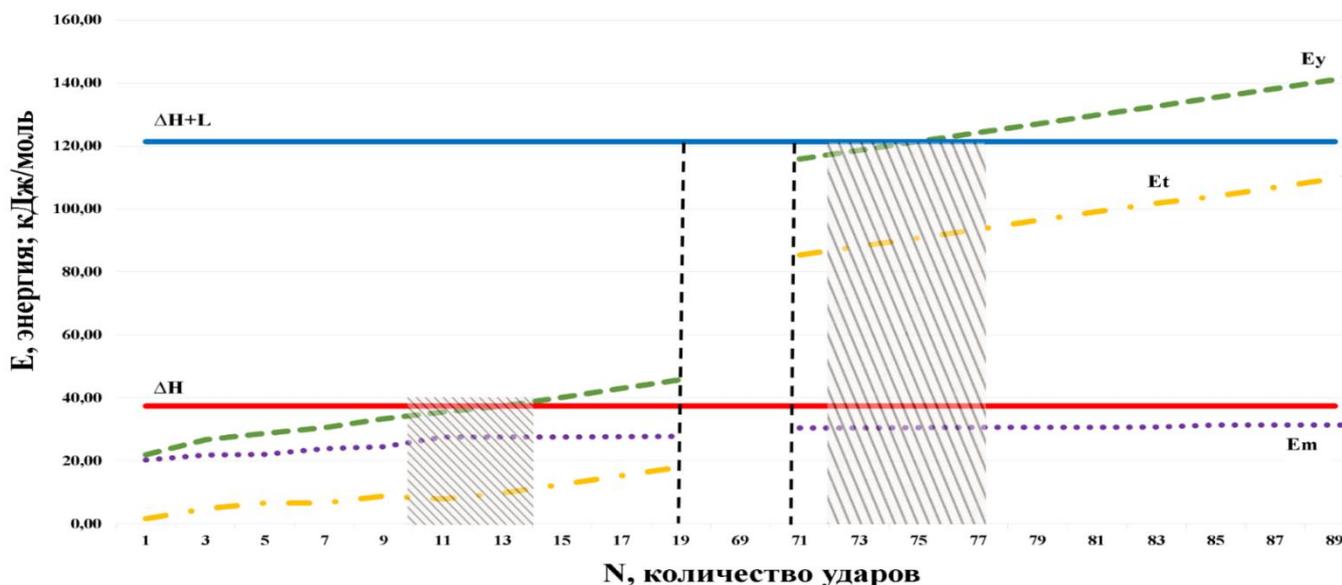


Рис. 2.24. Изменения величины энергии, накапливаемой в локальном объёме поверхности от количества актов ударно-силового воздействия на него и её составляющих (механической и тепловой)

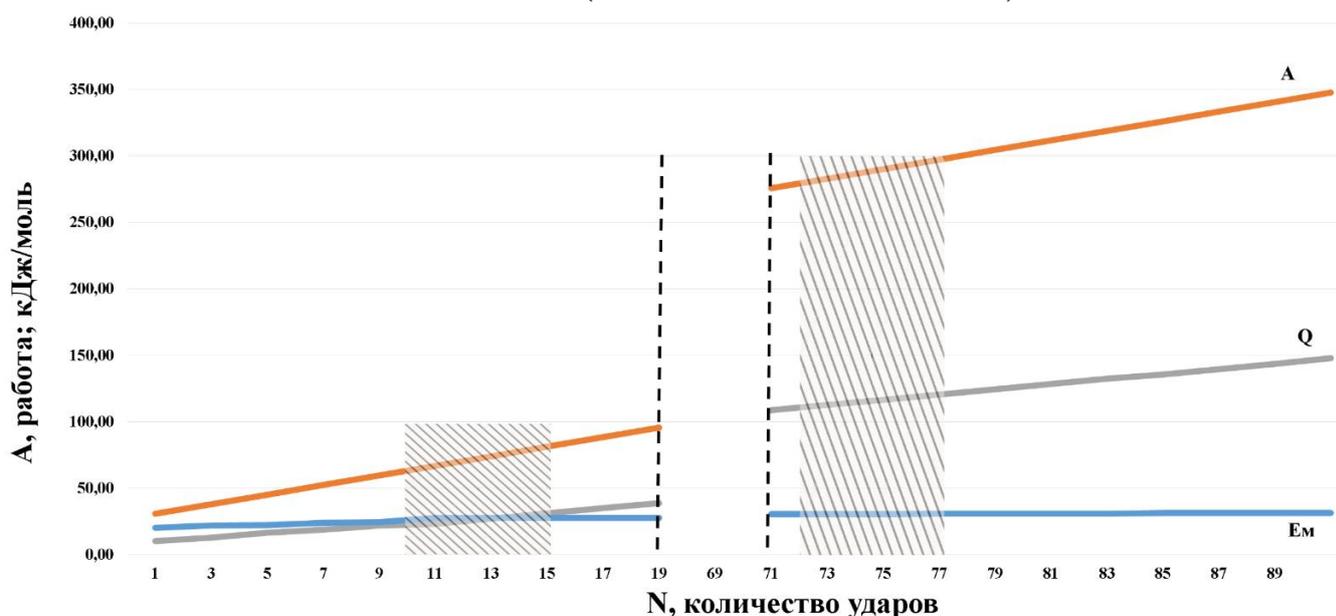


Рис. 2.25. Изменения работы энергии и теплового эффекта от количества актов ударно-силового воздействия

### Результаты экспериментальных исследований

1. Предельный рост энергии, накапливаемой в локальном объёме поверхности, происходит при осуществлении 10–14 актов контактного взаимодействия индентора с поверхностью (рис. 2.24).

2. Величина предельной энергии в пластически деформированном локальном объёме поверхности соизмерима (с погрешностью в пределах 15 %) с

величиной, равной разности теплосодержания (энтальпии) материала в твердом состоянии при температуре плавления и энтальпии при 293 °К, что подтверждает обоснованность выбора этой термодинамической величины в качестве критерия упрочнения поверхности динамическими методами ППВ.

3. Доля энергии, определяющей энергетическое состояние локального микрообъёма в общем объёме всей работы, затраченной на его модификацию в процессе пластической деформации, составляет 70 %.

4. Разрушение поверхности пластических отпечатков установлено на уровне 72–77 актов ударного контактного взаимодействия индентора с поверхностью, при этом величина энергии, накапливаемая в локальном объёме поверхности, при котором зафиксировано начало разрушение поверхности составила 124,23 кДж/моль, которая превышает критерий  $\Delta H$  на величину, равную 84 кДж/моль, соизмеримую с теплотой плавления для исследуемых материалов.

## **Выводы по главе 2.**

1. Разработана энергетическая модель, раскрывающая механизм изменения энергетического состояния локального объёма в процессе ДППВ, учитывающая влияние на процесс микро и субструктурных преобразований теплового эффекта и работу неупругих сил.

2. Энергетическая модель ДППВ позволяет определить предельное энергетическое состояние граничных с окружающей средой локальных объёмов поверхностного слоя, расположенных у поверхности детали, при котором они сохраняют (без разрушения) после ДППВ свои прочностные свойства.

3. На основе калориметрического метода установлено:

- величина предельной энергии в пластически деформированном локальном объёме поверхности соизмерима (с погрешностью в пределах 15 %) с величиной, равной разности теплосодержания (энтальпии) материала в твердом состоянии при температуре плавления и энтальпии при 293 0К, что подтверждает обоснованность выбора этой термодинамической величины в качестве критерия упрочнения поверхности динамическими методами ППВ.

-эффект разрушения поверхности наступает при энергетическом состоянии локальных объёмов превышающего критерий  $\Delta H$  на величину, соизмеримую с теплотой плавления для исследуемых материалов.

### ГЛАВА 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ И ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ПРОЦЕССА ППВ НА ОСНОВЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КРИТЕРИЯ

#### 3.1. Энергетический метод оценки продолжительности обработки ППВ

Разработанная в главе 2 энергетическая модель, которая качественно и количественно описывает изменение энергетического состояния поверхностного слоя, модифицированного в процессе ППВ динамическими методами, и подтверждённый в результате экспериментальных исследований энергетический критерий упрочнения, позволяют предложить качественно новые методы обоснования наиболее рациональных технологических режимов упрочняющей обработки ППВ и определить физико-механические характеристики качества упрочнённого поверхностного слоя.

Рассмотрим технологическую задачу, связанную с обоснованием продолжительности обработки методами ДППВ, обеспечивающей достижение наибольшего эффекта упрочнения. Для решения этой задачи воспользуемся условием (2.9) и преобразуем его к виду:

$$t = \tau_0 \cdot \exp\left(\frac{\Delta H - E_0 - k_\sigma k_H V_m \sigma^4 \sqrt{\frac{3m_\Sigma \cdot k_D \cdot V^2}{HV \cdot D^3}}}{TR}\right), \text{ с} \quad (3.1)$$

Исходя из физической сущности динамических методов ППВ, активируемый ими процесс изменения энергетического состояния локальных микрообъёмов во времени представляет собой поэтапный процесс накопления дефектов в его кристаллической решётке. Поэтому общее время модификации локального микрообъёма в процессе ППВ будет складываться из продолжительностей последовательных единичных локальных (точечных) соприкосновений инденторов с рабочей поверхностью контактным методом.

Для определения продолжительности единичных локальных (точечных) контактных взаимодействий инденторов с поверхностью используем выражение, предложенное в работе [98]:

$$t_1 = 0,21 \cdot \frac{d_k}{V}, \text{ с}, \quad (3.2)$$

где  $d_k$ - размер пластического отпечатка, м;  $V$ - скорость соударения индентора с поверхностью, м/с.

Используя эту зависимость, общее время модификации локального микрообъема в процессе ППВ, при которой обеспечивается наибольший эффект упрочнения локального микрообъёма, будет равно:

$$t = 0,21 \cdot \frac{d_k}{V} \cdot i_{\text{пр}}, \quad (3.3)$$

Сравнив зависимости 3.1 и 3.3, получим выражение для определения предельного количества циклов ударно-импульсного силового нагружения гранично-приближенного к обрабатываемой поверхности локального микрообъёма, обеспечивающих наибольший эффект его упрочнения:

$$i_{\text{пр}} = 4,8 \tau_0 \cdot V/d_k \exp\left(\frac{\Delta H - E_0 - k_\sigma k_H V m \sigma^4 \sqrt{\frac{3m_\Sigma \cdot k_D \cdot V^2}{HV \cdot D^3}}}{TR}\right), \quad (3.4)$$

Расчет предельного количества циклов ударно-импульсного силового нагружения элемента ПС, проведённый по формуле (3.4), и его сравнение с установленным в результате экспериментальных исследований, проведенных в работе [66] и главе 2, показал совпадение расчётных и экспериментальных значений, представленных в табл. 3.1.

Выражение (3.1) определяет общее время контактного взаимодействия индентора с обрабатываемой поверхностью, при котором наиболее приближенные к поверхности детали локальные микрообъёмы и соответственно упрочнённый ПС переходят из одного энергетического состояния в другое, при этом сохраняют (без разрушения) прочностные свойства.

## Предельное количество циклов силового нагружения элемента ПС при ППВ

| Материал | HV,<br>МПа | Диаметр или<br>радиус<br>индентора, мм | Научная<br>литература<br>(Кудрявцев)<br>$i_{np}^a$ | Расчёт<br>$i_{np}^p$ |
|----------|------------|--|--|----------------------|
| Сталь 20 | 1630       | R = 5                                  | 12   | 12                   |
| Сталь 35 | 1670       | R = 5                                  | 12   | 12                   |
| Сталь 45 | 1700       | R = 5                                  | 12   | 12                   |
| Ст3      | 1120       | D = 10                                 | 14   | 15                   |
|          |            | D = 6,34                               | 13   |                      |
|          |            | D = 2,32                               | 13   |                      |
| 12ХН4ВА  | 3400       | D = 10                                 | 6  | 8                    |
|          |            | D = 8                                  | 9  |                      |
|          |            | D = 4                                  | 10   |                      |
| 35ХМ     | 2070       | D = 10                                 | 11   | 11                   |
|          |            | D = 7,92                               | 12   |                      |

Выразим время длительности контактного взаимодействия с локальным объёмом соотношением:

$$t = t_{\phi} \cdot P,$$

где  $P$  – возможность того, что за одинарный цикл силового воздействия на локальный микрообъём в нем происходят микро и субструктурные изменения,  $t_{\phi}$  – продолжительность контактирования в реальных условиях  $t_{\phi} > t$ .

Представив вероятность  $P = \sigma/HV$ , где HV – твёрдость материала обрабатываемой поверхности;  $\sigma$  – напряжение в зоне контакта индентора обрабатывающей среды с обрабатываемой поверхностью, получим выражение определяющего время фактического контактирования  $t_{\phi}$ , необходимое для активации микро и субструктурных изменений локального микрообъёма  $V_m$  с учётом силовых параметров процесса ППВ и физико-механических характеристик обрабатываемого материала:

$$t_{\phi} = \frac{\tau_0 HV}{\sigma} \cdot \exp\left(\frac{\Delta H - E_0 - k_{\sigma} k_H V_m \sigma^4 \sqrt{\frac{3m_{\Sigma} \cdot k_D \cdot V^2}{HV \cdot D^3}}}{TR}\right), \text{ с.} \quad (3.5)$$

Если принять, для динамических методов ППВ свободнодвижущимися инденторами за параметр оценивающий характер взаимодействия инденторов с обрабатываемой поверхностью, спроектированную на неё ими единичную площадь квадрата упаковки инденторов  $S_{уп}$  в момент их контактного взаимодействия с обрабатываемой поверхностью, то можно оценить общее время фактического контактирования инденторов обрабатываемой среды с обрабатываемой поверхностью  $t_{\phi}$ , необходимое для активации микро и субструктурных изменений локального микрообъёма, как:

$$t_{\phi} = t_y \cdot P_r,$$

где  $P_r$  – вероятность того, что каждый пластически деформированный локальный микрообъём площадью  $\sqrt[3]{V_m^2}$  в пределах свойственного конкретному методу ППВ параметра  $S_{уп}$  будет иметь энергетическое состояние, при котором он сохраняет (без разрушения) свои прочностные свойства.

Таким образом, выразив вероятность  $P_r$  в виде отношения  $\frac{\sqrt[3]{V_m^2}}{S_{уп}}$ , получим зависимость для расчёта продолжительности упрочняющей обработки динамическими методами ППВ:

$$t_y = \frac{\tau_0 \cdot HV \cdot S_{уп}}{\sigma^3 \sqrt[3]{V_m^2}} \cdot \exp\left(\frac{\Delta H - E_o - k_{\sigma} k_H V_m \sigma^4 \sqrt{\frac{3m_{\Sigma} \cdot k_D \cdot V^2}{HV \cdot D^3}}}{TR}\right), \text{ с}, \quad (3.6)$$

Для виброударной обработки с параметром  $S_{уп} = D^2$  зависимость (3.6) будет иметь вид:

$$t_y = \frac{\tau_0 \cdot HV \cdot D^2}{\sigma^3 \sqrt[3]{V_m^2}} \cdot \exp\left(\frac{\Delta H - E_o - k_{\sigma} k_H V_m \sigma^4 \sqrt{\frac{3m_{\Sigma} \cdot k_D \cdot V^2}{HV \cdot D^3}}}{TR}\right), \text{ с}. \quad (3.7)$$

### 3.2. Энергетический метод оценки качества поверхностного слоя, упрочненного методами ДППВ

Задача данного раздела диссертационного исследования –разработать более объективные методы их аналитической оценки характеристик качества упрочнённого ДППВ поверхностного слоя, которые позволили бы упростить процессы проектирования технологий упрочняющей обработки деталей. Исследования, проведённые в главе 2, позволяют решить эту задачу на качественно другом уровне.

#### 3.2.1. Расчет твёрдости поверхностного слоя

Исследованиями, представленными в научно-технической литературе [52, 65, 132, 133 и др.], установлена и экспериментально доказана корреляционная связь твёрдости с различными механическими характеристиками материалов, такими как предел текучести, предел прочности, сопротивление разрыву и другими.

Так в работе [132], предложена обобщающая зависимость, устанавливающая с высокой степенью корреляции (0,956) связь твёрдости и интенсивности напряжения и применима для широкой номенклатуры сталей и других материалов:

$$\sigma_i = 0,067HV_{пс}, \text{ Па}, \quad (3.8)$$

где  $HV_{пс}$  – поверхностная твёрдость материала по Виккерсу, Па.

Основываясь на исследованиях А. Гриффитса и Орована [42], посвящённых изучению явлений разрушения и течения твердого тела, установлена функциональная связь интенсивности напряжения с плотностью накопленной внутренней энергии в локальном микрообъёме в виде соотношения:

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{6GE}{V_m}}, \text{ Па}, \quad (3.9)$$

где  $G$  – модуль сдвига, Па;  $E$  – внутренняя энергия локального микрообъёма поверхностного слоя, Дж/моль;  $V_m$ -молярный объём, м<sup>3</sup>/моль.

Из выражений (3.8) и (3.9) вытекает корреляционная связь энергетического состояния локального микрообъёма и как следствие, поверхностного слоя, с его твёрдостью:

$$E = K_{\text{пр}} \cdot HV_{\text{ПС}}^2, \text{ Дж/моль}, \quad (3.10)$$

Где  $K_{\text{пр}}$  – коэффициент, характеризующий прочностные свойства упрочняемого материала,  $K_{\text{пр}} = \frac{0,067^2}{6G} V_m = \frac{2V_m 10^{-3}}{3G}$ , м<sup>3</sup>/моль·Па.

Полученное выражение (3.10) даёт возможность по индентированной твёрдости поверхностного слоя оценить его энергетическое состояние и наоборот, по расчетной величине энергетического состояния оценить твёрдость поверхностного слоя, модифицированного в процессе механической обработки. Так, начальная плотность внутренней энергии  $E_0$  может быть оценена по соотношению (3.10), если в неё подставить значение твердости ПС в исходном до деформирования состоянии:

$$E_0 = K_{\text{пр}} \cdot HV_{\text{исх}}^2, \text{ Дж/моль}, \quad (3.11)$$

Из соотношения (3.10) вытекает формула для определения твёрдости пластически деформированных в процессе ППВ динамическими методами расположенных у поверхности локальных микрообъёмов:

$$HV_{\text{ПС}} = \sqrt{E/K_{\text{пр}}}, \text{ Па}, \quad (3.12)$$

Согласно энергетической модели процесса ДППВ, наибольший эффект упрочнения, будет достигнут тогда, когда энергетическое состояние локальных объёмов достигнет величины, советуемое энергетическому критерию упрочнения равного  $\Delta H$ . При этом твёрдость их будет равна:

$$HV_{\text{ПС}}^* = \sqrt{\Delta H/K_{\text{пр}}}, \text{ Па}. \quad (3.13)$$

### 3.2.2. Расчет глубины упрочнённого слоя

Глубина является одним из самых проблематичных характеристик качества поверхностного слоя, поскольку установить её точно не представляется возможным. Именно по этой причине на сегодняшний день разработано большое количество аналитических моделей. Анализ их показывает, что все они строятся с учётом исходной твёрдости подвергаемого упрочнению материала и

характеристик, которые опосредовано отражают (например, размеры пластического отпечатка, степень деформации, величину минимальных касательных напряжений) или влияют на изменения энергетического состояния модифицированного в процессе ППВ поверхностного слоя (скорость соударения, диаметр инденторов обрабатывающей среды). Кроме того, нет однозначного ответа, по какому параметру объективно оценивать глубину упрочнённого слоя: по величине снижения прироста твёрдости или по глубине залегания остаточных сжимающих напряжений.

В этой связи представляется наиболее объективным подход, основанный на установлении корреляционной связи глубины поверхностного слоя непосредственно с его энергетическим состоянием, положив в её основу изменения прироста твёрдости локальных микрообъёмов по глубине пластически деформированного слоя в виде:

$$h_n = \gamma \left( K \delta_{Hy} \right)^c, \quad (3.14)$$

где  $\delta_{Hy}$  – относительный прирост твердости локальных микрообъёмов, расположенных у поверхности детали,  $\delta_{Hy} = \frac{(HV_{пс}^* - HV_{исх})}{HV_{исх}}$ ;  $K$  – параметр, выбранный для исследования.

В результате экспериментальных исследований, приведённых в работах [34; 58; 83; 101; 112,132 и других], установлено, что параметры  $\gamma$  и  $c$ , входящие в аппроксимирующее уравнение (3.14) в процессе ППВ образцов из различных сталей и материалов свободнодвижущимися инденторами со скоростями от 1 до 100 м/с составляют в среднем:  $\gamma = 0,45$ ;  $c = 0,3$ . С учетом направленности проводимых в работе исследований в качестве параметра  $K$  примем, пластически деформируемый в процессе ППВ динамическими методами, локальный микрообъём, соизмеримый с объёмом одного моля подвергаемого упрочнению материала  $\vartheta$ . Тогда выражение для определения глубины упрочненного ДППВ слоя можно записать:

$$h_n = 0,45 \sqrt[3]{\vartheta \delta_{Hy}}, \text{ м}, \quad (3.15)$$

При обеспечении наибольшего эффекта упрочнения, при котором локальные микрообъёмы, расположенные у поверхности детали, и соответственно упрочнённый ПС, сохраняют (без разрушения) прочностные свойства, с учетом (3.15), выражение для оценки глубины упрочнённого слоя будет иметь вид:

$$h_{\text{н}}^* = 0,45 \sqrt[3]{\vartheta \left( \frac{[\Delta H / K_{\text{пр}}]^{0,5} - HV_{\text{исх}}}{HV_{\text{исх}}} \right)}, \text{ м.} \quad (3.16)$$

### 3.2.3. Расчёт величины остаточных сжимающих напряжений в поверхностном слое

Предложенная в разделе 3.2.1 обобщенная зависимость (3.5) интенсивности напряжённого состояния пластически деформированных локальных микрообъёмов в функции от их твёрдости позволяет применить её для прогнозирования величины остаточных сжимающих напряжений в виде:

$$\sigma_0 = 0,067 HV_{\text{ПС}}, \text{ Па.} \quad (3.17)$$

В результате проведённых в этом направлении экспериментальных исследований [9; 47; 111; 137] доказано, что величина остаточных сжимающих напряжений в упрочненном поверхностном слое возрастает с увеличением напряженного состояния локальных микрообъёмов и имеет максимум у поверхности, где локальные микрообъёмы имеют наибольший эффект упрочнения.

Таким образом, используя зависимость (3.17), величину максимальных остаточных сжимающих напряжений, создаваемых в поверхностном слое, упрочнённом в процессе ППВ динамическими методами, можно прогнозировать используя следующее выражение:

$$\sigma_0^* \approx -0,067 \left[ \sqrt{\Delta H / K_{\text{пр}}} \right], \text{ Па.} \quad (3.18)$$

Отличительной особенностью предложенных зависимостей является то, что они позволяют исходя из механических и термодинамических свойств, присущих материалу детали, на предварительных этапах проектирования технологии изготовления деталей обосновать физико-механические параметры качества, которые могут быть получены в

процессе упрочнения динамическими методами ППВ с наибольшим технологическим эффектом упрочнения, обеспечивающим величину плотности внутренней энергии граничных локальных микрообъемов, при которой они и соответственно упрочняемый ПС сохраняют (без разрушения) прочностные свойства.

Кроме того, обоснованные на основе предложенных зависимостей (3.13; 3.16; 3.18) методы расчета физико-механических характеристик качества упрочнённого поверхностного слоя могут выступать в качестве критериев при выборе динамических методов ППВ, рациональных условий и режимов упрочняющей обработки.

### **3.3. Экспериментальное обоснование энергетических методов расчета характеристик качества поверхностного слоя (на примере виброударной обработки)**

#### **3.3.1. Общая методика экспериментальных исследований**

Целью настоящих исследований являлось подтверждение расчетных зависимостей характеристик качества упрочненного поверхностного слоя, полученных в разд. 3.2.1–3.2.3.

Проверка адекватности расчетных зависимостей проводилась в следующей последовательности:

1. На основе анализа научно-технической литературы выбирались результаты экспериментальных исследований влияния динамических методов ППВ на качество поверхностного слоя. Кроме того, проводились дополнительные экспериментальные исследования в условиях виброударного упрочнения по установлению вышеуказанных зависимостей с использованием технических средств, режимов обработки, представленных в разделе 4.1.2.

2. Для выбранных и полученных в ходе экспериментальных исследований зависимостей проводился расчет параметров качества по следующим формулам:

- твердость поверхностного слоя определялась по формуле (3.13);
- глубина упрочненного слоя (3.16);

– величина остаточных сжимающих напряжений (3.18).

3. Проводился сравнительный анализ экспериментальных и расчетных значений физико-механических параметров качества поверхностного слоя и определялась погрешность по формуле:

$$\delta = \frac{T_{\text{э}} - T_{\text{р}}}{T_{\text{э}}} \times 100\% .$$

4. По результатам проведенных исследований делались соответствующие выводы.

### **3.3.2. Технические средства экспериментальных исследований и режимы обработки**

Упрочнение образцов проводилось виброударным методом на установке, предназначенной для экспериментов и опытов (рис.3.1), технические характеристики которой приведены в приложении 1.

Обрабатываемая среда - стальные инденторы из материала ШХ15 диаметром 6 мм.

Образцы размером 20 x 20 и толщиной 2 мм изготавливались из материала Сталь20 и Сталь 40Х.

Твердость поверхности измерялась на установке Nanotest 600 Platform Three, представленной на рис. 2.16.

Дополнительные экспериментальные исследования проводились на следующих режимах виброударной обработки:  $A = 3$  мм,  $f = 33$  Гц, время упрочнения – 20 мин.

Примечание: время обработки устанавливалось по формуле (3.1) при условии, что кратность контактного взаимодействия индентора с локальной поверхностью находится в пределах 12–14 ударов.

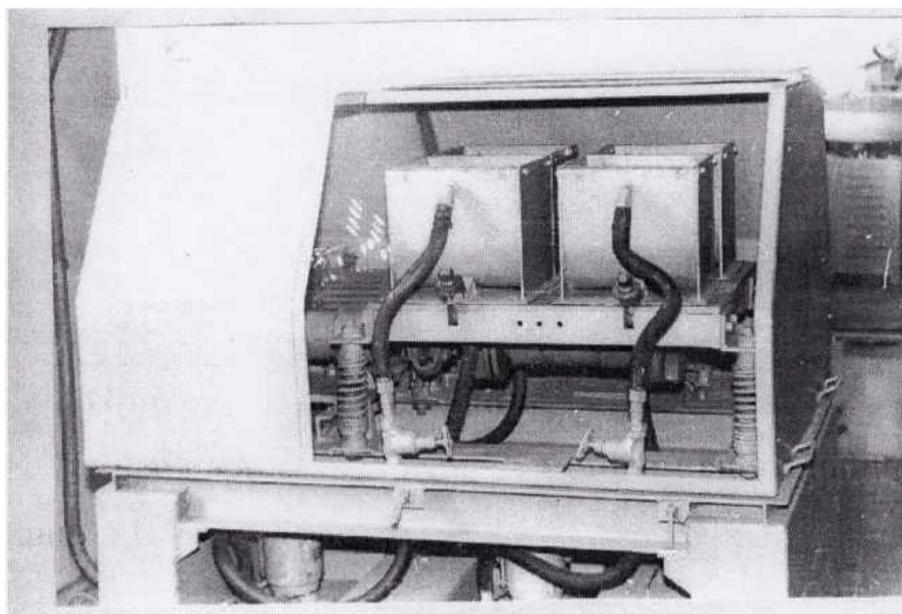
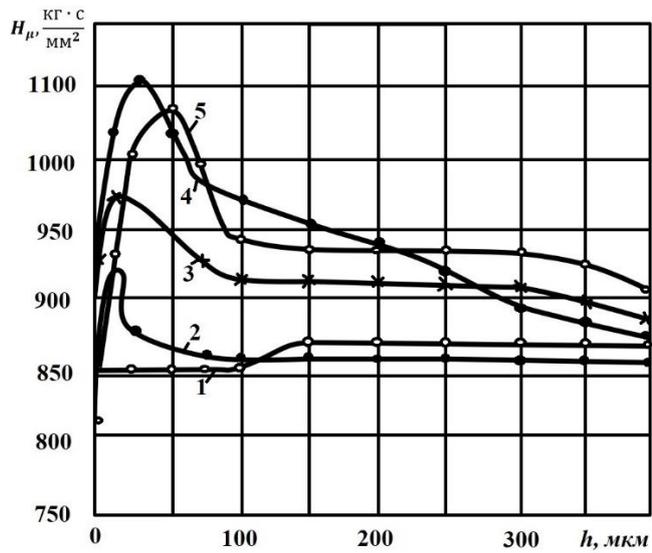


Рис. 3.1. Вибрационная установка УВГ 4x10ю

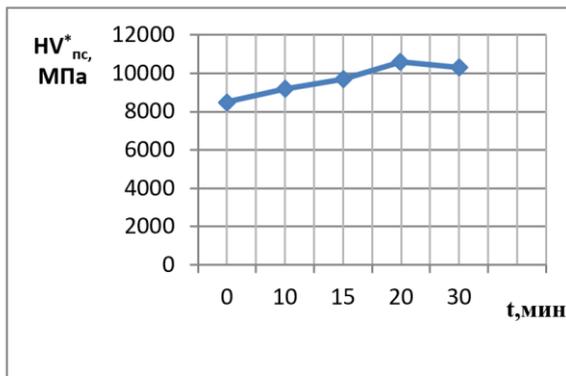
### 3.3.3. Результаты исследований

Для оценки адекватности расчетной зависимости эффективной твердости и глубины упрочнения поверхностного слоя были рассмотрены результаты экспериментальных исследований, полученные в работах [15; 35] и представленные на рис. 3.2–3.6. На основании этих результатов были построены графики изменения максимальной твердости (рис. 3.2–3.6) и максимальной глубины упрочнения (3.2–3.6) в зависимости от длительности обрабатывающего воздействия. Результаты представлены на рис. 3.2–3.6 и табл. 3.3, 3.4, раскрывают сравнение экспериментальных и расчетных данных и их влияние на оценку производительной продолжительности обработки.

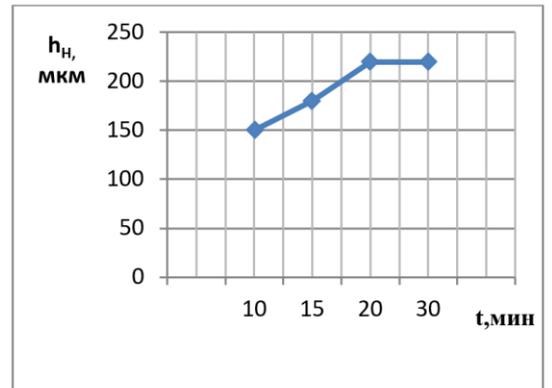
На рис. 3.2–3.6 и в табл. 3.3, 3.4. приведены результаты сравнительного анализа экспериментальных и расчетных значений по оценке эффективной продолжительности обработки и достигаемой при этом максимальной твердости и глубины упрочнения.



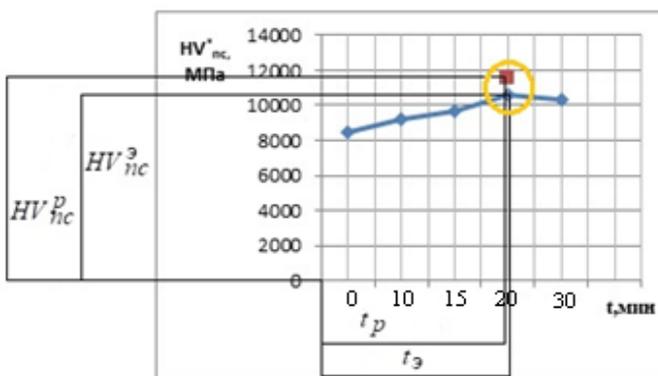
а)



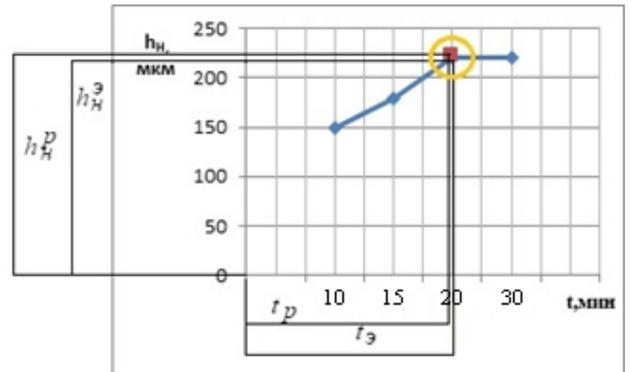
б)



в)



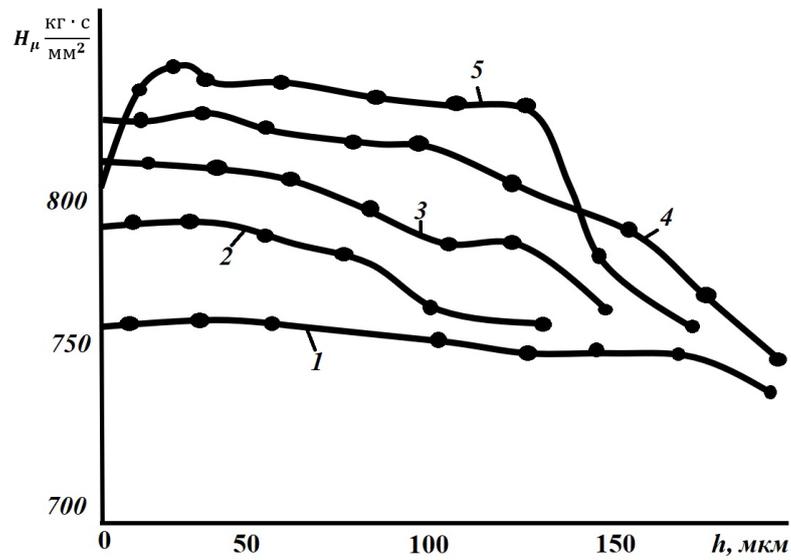
г)



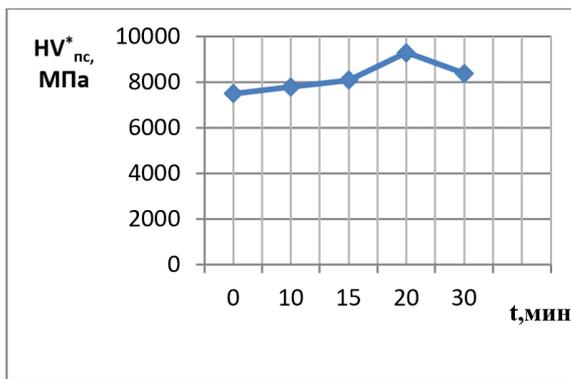
д)

Рис. 3.2. Влияние виброударной обработки на изменение твердости образцов из стали 16ХЗНВМФБШ при  $A = 2,5$  мм,  $f = 30$  Гц,  $d_{in} = 8$  мм,  $HV = 8500$  МПа: а – изменения твердости по глубине упрочненного слоя: при 1 – исходная; 2 –  $t = 10$  мин; 3 –  $t = 15$  мин; 4 –  $t = 20$  мин; 5 –  $t = 30$  мин; б – изменение максимальной твердости в зависимости от продолжительности обработки; в – изменение максимальной глубины упрочнения в зависимости от продолжительности обработки; г – расчетная продолжительность обработки и

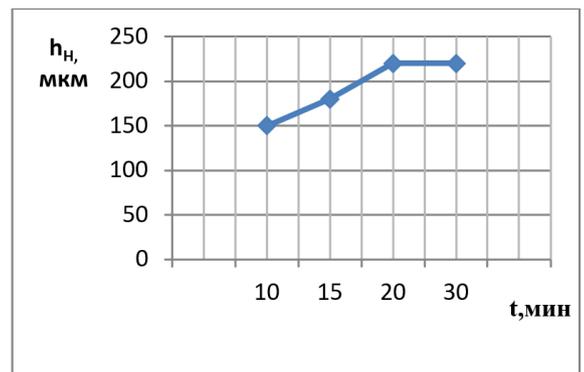
соответствующая ей максимальная твердость;  $d$  – расчетная продолжительность обработки и соответствующая ей максимальная глубина упрочнения



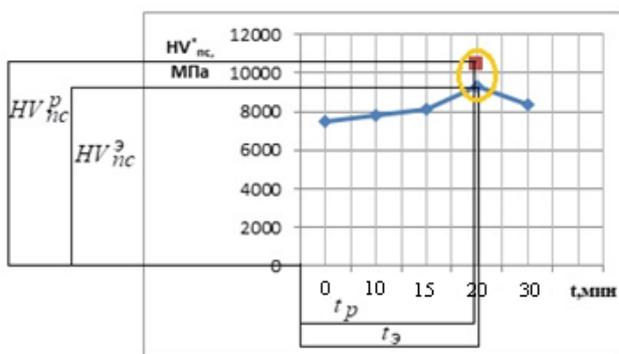
а)



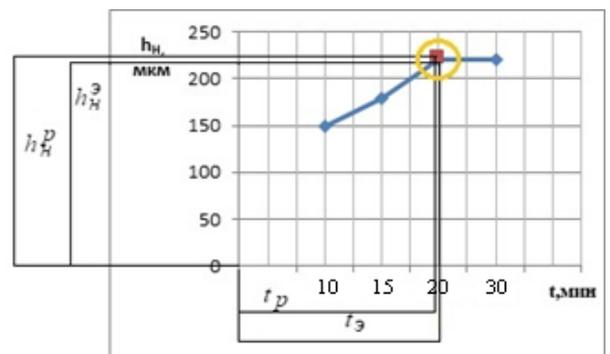
б)



в)



г)



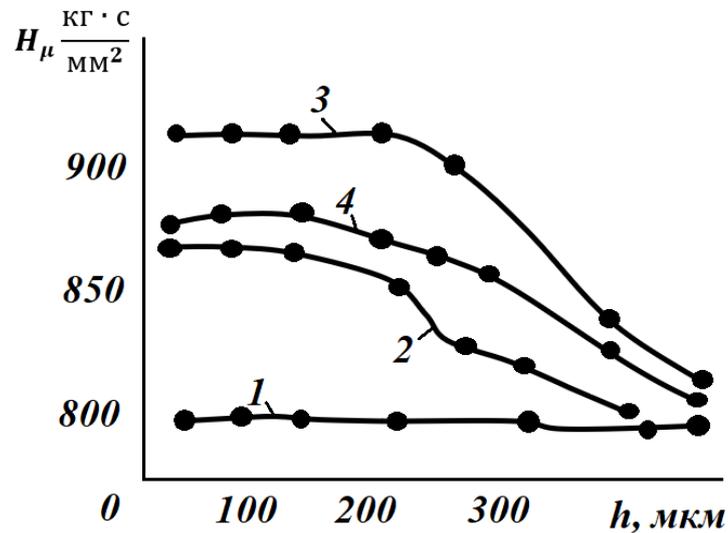
д)

Рис. 3.3. Влияние виброударной обработки на изменение твердости образцов из стали 30 ХЗВА при  $A = 2,5$  мм,  $f = 30$  Гц,  $d_{\text{ин}} = 8$  мм,  $HV = 7500$  МПа:

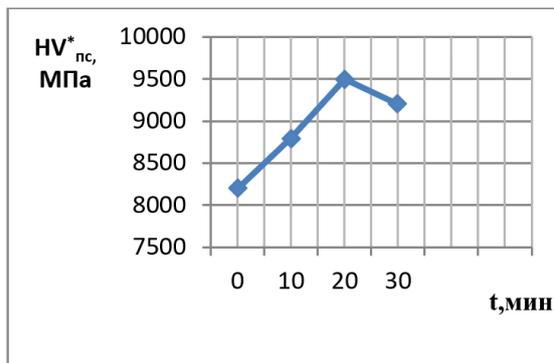
а – изменения твердости по глубине упрочненного слоя:

при 1 – исходная; 2 –  $t = 10$  мин; 3 –  $t = 15$  мин; 4 –  $t = 30$  мин; 5 –  $t = 20$  мин;

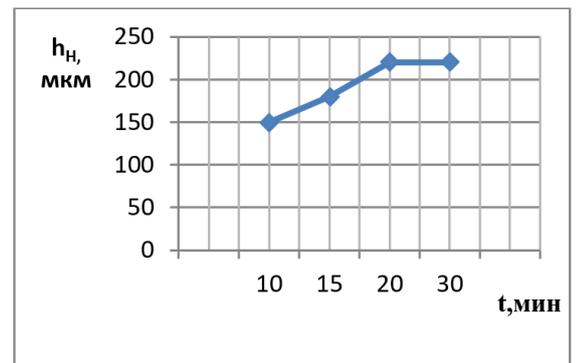
б – изменение максимальной твердости в зависимости от продолжительности обработки; в – изменение максимальной глубины упрочнения в зависимости от продолжительности обработки; г – расчетная продолжительность обработки и соответствующая ей максимальная твердость; д – расчетная продолжительность обработки и соответствующая ей максимальная глубина упрочнения



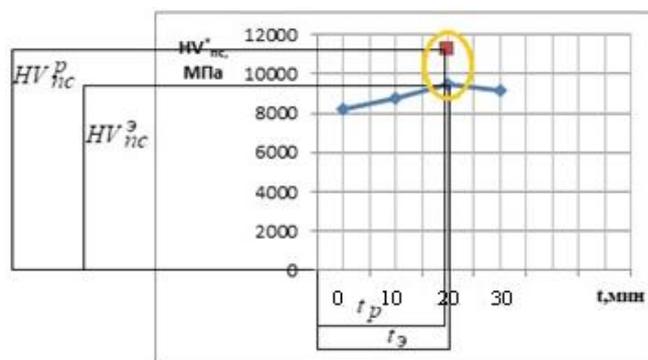
а)



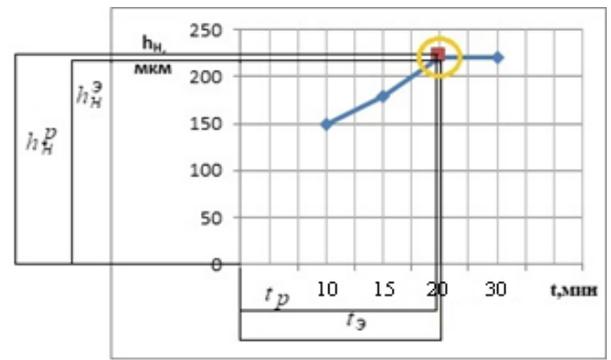
б)



в)



г)

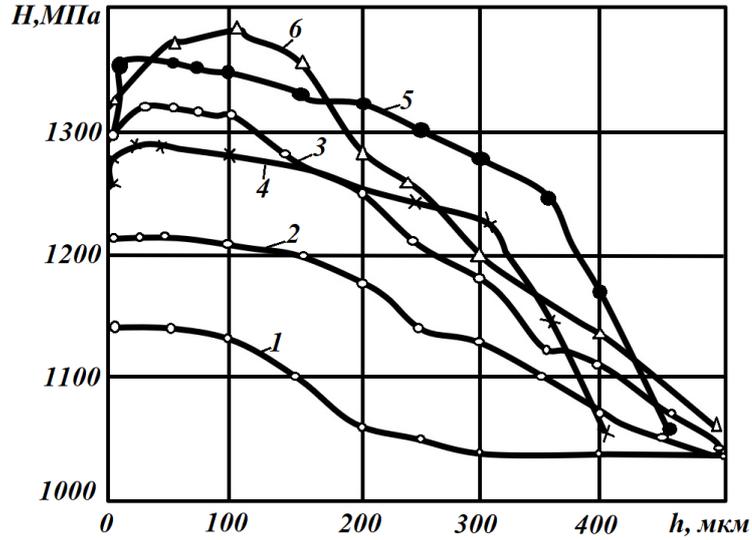


д)

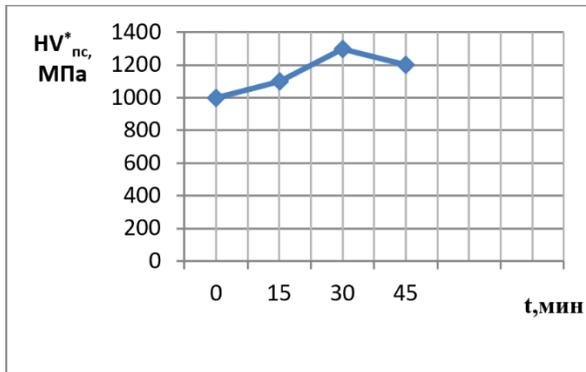
Рис. 3.4. Влияние виброударной обработки на изменение твердости образцов из стали 20 ХЗВМФ при  $A = 4,5$  мм,  $f = 30$  Гц,  $d_{in} = 8$  мм,  $HV = 8000$  МПа:

а – изменения твердости по глубине упрочненного слоя; при 1 – исходная; 2 –  $t = 10$  мин; 3 –  $t = 20$  мин; 4 –  $t = 30$  мин;

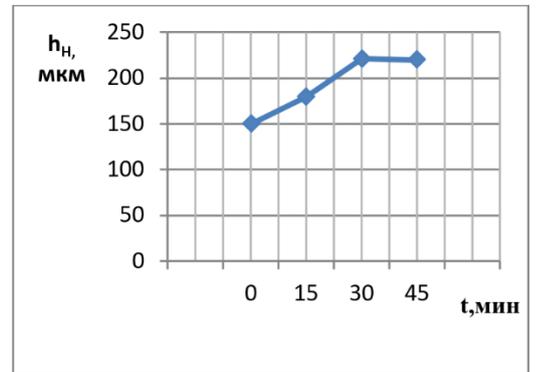
б – изменение максимальной твердости в зависимости от продолжительности обработки; в – изменение максимальной глубины упрочнения в зависимости от продолжительности обработки; г – расчетная продолжительность обработки и соответствующая ей максимальная твердость; д – расчетная продолжительность обработки и соответствующая ей максимальная глубина упрочнения



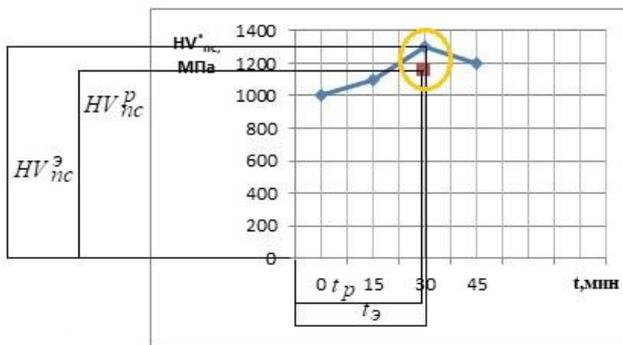
а)



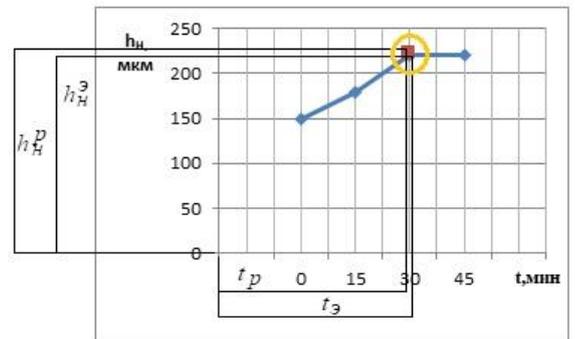
б)



в)



г)

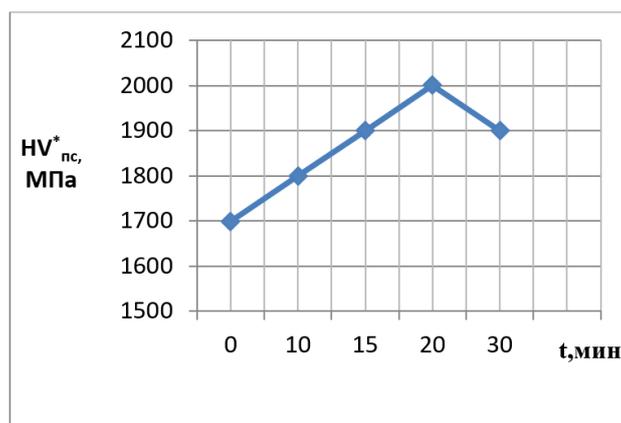
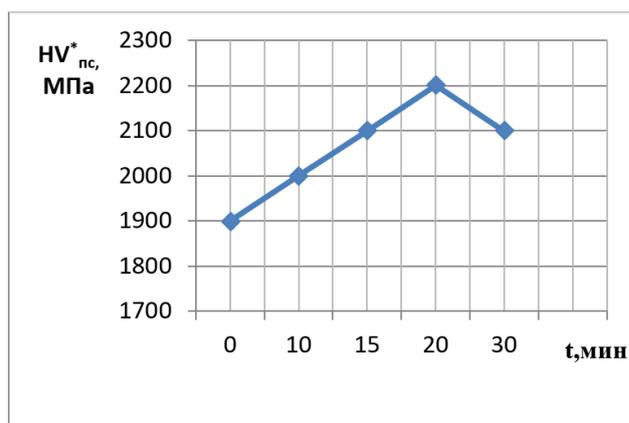


д)

Рис. 3.5. Влияние условий обработки на микротвердость поверхностного слоя образца из алюминиевого сплава АК6Т-1:

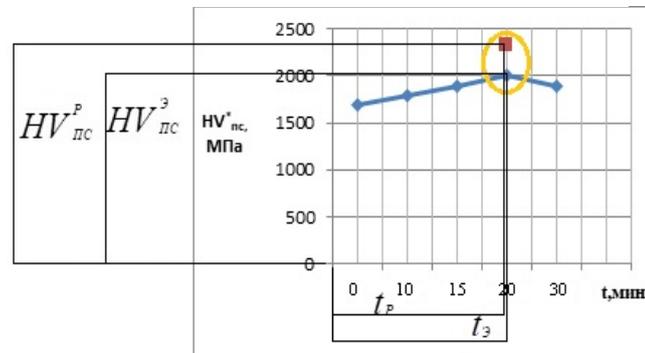
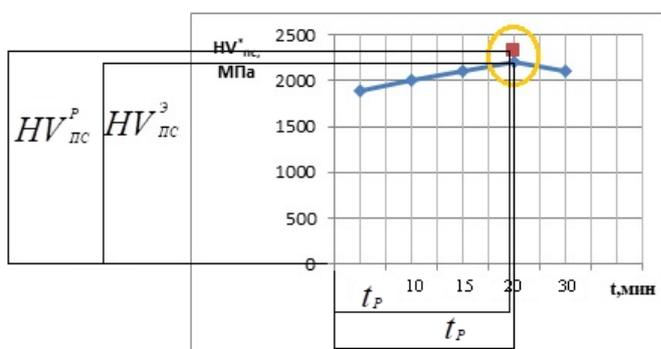
а – 1)  $A = 2,5$  мм,  $t = 15$  мин,  $d_{in} = 8$  мм; 2)  $A = 2,5$  мм,  $t = 20$  мин,  $d_{in} = 8$  мм; 3)  $A = 2,5$  мм,  $t = 30$  мин,  $d_{in} = 8$  мм; 4)  $A = 4,5$  мм,  $t = 20$  мин,  $d_{in} = 8$  мм; 5)  $A = 4,5$  мм,  $t = 30$  мин,  $d_{in} = 8$  мм; 6)  $A = 4,5$  мм,  $t = 30$  мин,  $d_{nr} = 14$  мм;

б – изменение максимальной твердости в зависимости от продолжительности обработки; в – изменение максимальной глубины упрочнения в зависимости от продолжительности обработки; г – расчетная продолжительность обработки и соответствующая ей максимальная твердость; д – расчетная продолжительность обработки и соответствующая ей максимальная глубина упрочнения



а)

б)



в)

г)

Рис. 3.6. Экспериментальные исследования влияния виброударной обработки на изменение твердости образцов исходная твердость стали  $HV_0 = 1000$  МПа:

а – изменения твердости образцов из стали 40X при:

1 – исходная; 2 –  $t = 10$  мин; 3 –  $t = 15$  мин; 4 –  $t = 20$  мин; 5 –  $t = 30$  мин;

б – изменения твердости образцов из стали 20 при

1 – исходная; 2 –  $t = 10$  мин; 3 –  $t = 15$  мин; 4 –  $t = 20$  мин; 5 –  $t = 30$  мин;

в – расчетная продолжительность обработки и соответствующая ей максимальная твердость для стали 40X;

г – расчетная продолжительность обработки и соответствующая ей максимальная твердость для стали 20

Таблица 3.2

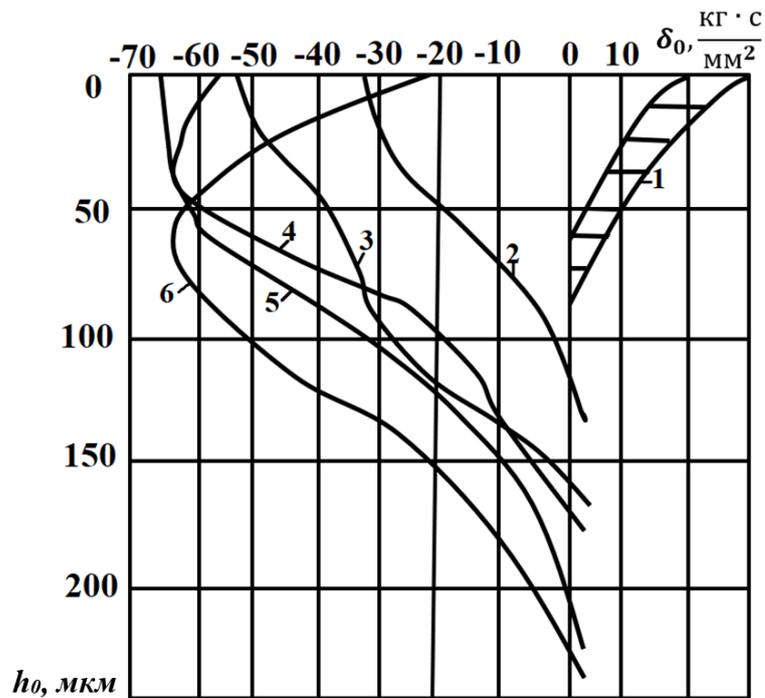
Сравнительный анализ результатов экспериментальных и расчетных данных по оценке продолжительности виброударной обработки и достигаемой при этом эффективной твердости поверхностного слоя

| Материал образца  | Условия обработки                                  | Время обработки и экспериментальное, мин. | Время обработки расчетное, мин. | Расчетная твердость HV <sub>расч.</sub> , (МПа) | Средняя экспериментальная твердость HV <sub>эсп.</sub> , (МПа) | Погрешность δ% |
|-------------------|--|---|---------------------------------|---|--|----------------|
| Сталь 16ХЗНВМФБ Ш | A = 2,5 мм,<br>f = 30 Гц,<br>D <sub>и</sub> = 6 мм | 10-20                                     | 118                             | 11525   | 10600  | 8,7            |
| 30 ХЗВА           | A = 2,5 мм,<br>f = 30 Гц,<br>D <sub>и</sub> = 8 мм | 10-20                                     | 140                             | 10416   | 9300   | 12             |
| 20 ХЗВМФ          | A = 4,5 мм,<br>f = 30 Гц,<br>D <sub>и</sub> = 8 мм | 10-20                                     | 120                             | 11195   | 9500   | 5              |
| АК6Т-1            | A = 2,5 мм,<br>f = 45 Гц,<br>D <sub>и</sub> = 8 мм | 10-20                                     | 28                              | 1153  | 1300   | 11,3           |
| Сталь 40Х         | A = 2,5 мм,<br>f = 45 Гц,<br>D <sub>и</sub> = 8 мм | 10-20                                     | 158                             | 2325  | 2200   | 5,3            |
| Сталь 20          | A = 2,5 мм,<br>f = 45 Гц,<br>D <sub>и</sub> = 8 мм | 10-20                                     | 158                             | 2325  | 2000   | 14             |

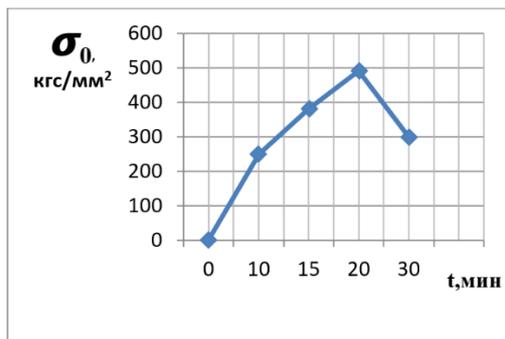
Сравнительный анализ результатов экспериментальных и расчетных данных  
по оценке максимальной глубины упрочненного слоя  
в процессе виброударной обработки

| Материал образца  | Время обработки экспериментальное, мин. | Время обработки расчетное, мин. | Глубина экспериментальная, мм | Глубина расчетная, мм | Погрешность $\delta, \%$ |
|-------------------|---|---------------------------------|-------------------------------|-----------------------|--------------------------|
| Сталь 16ХЗНВМ ФБШ | 10–20                                   | 18                              | 0,22                          | 0,25                  | 1,88                     |
| 30 ХЗВА           | 10–20                                   | 17                              | 0,2                           | 0,2215                | 9,7                      |
| 20 ХЗВМФ          | 10–20                                   | 20                              | 0,2                           | 0,2278                | 12,2                     |
| АК6Т-1            | 10–20                                   | 19                              | 0,21                          | 0,2134                | 1,5                      |

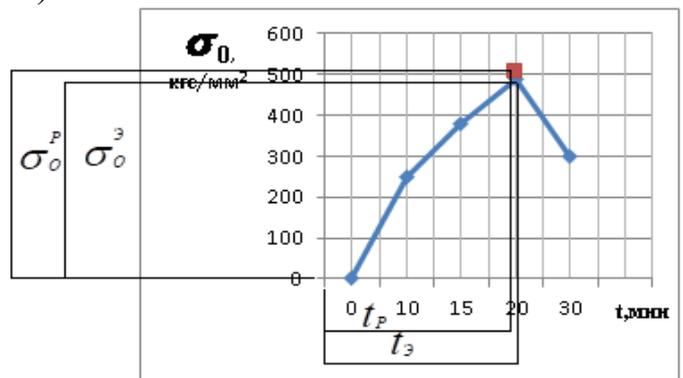
Для проверки адекватности расчетной зависимости по оценке остаточных сжимающих напряжений рассмотрены результаты экспериментальных исследований, полученные в работах и представленные на рис. 3.7, а, 3.8, а. На основании этих результатов построены графики изменения величины максимального остаточного напряжения в поверхностном слое (рис. 3.7, б, 3.8, б) в зависимости от продолжительности обработки. На рис. 3.7, в, 3.8, в, приведены различные остаточные напряжения, полученные расчетным и экспериментальным методом, достигаемые в поверхностном слое за оптимальное время упрочнения.



а)



б)



в)

Рис. 3.7. Изменение осевых ОН при ВиУО образцов: сталь 30ХЗВА, азотированная и термообработанная, HV – 800 МПа: а – эпюры распределения остаточных напряжений по глубине упрочненного поверхностного слоя при различной продолжительности обработки: 1 – исходная; 2 –  $t = 10$  мин; 3 –  $t = 15$  мин; 4 –  $t = 20$  мин; 5 –  $t = 30$  мин; б – изменение величины максимальных остаточных напряжений в зависимости от продолжительности обработки; в – экспериментальные и расчетные значения величины остаточных напряжений, достигаемых в поверхностном слое за оптимальное время упрочнения



различных материалов, а также приведены расчетные значения максимальных остаточных напряжений, рассчитанных по формуле (3.18).

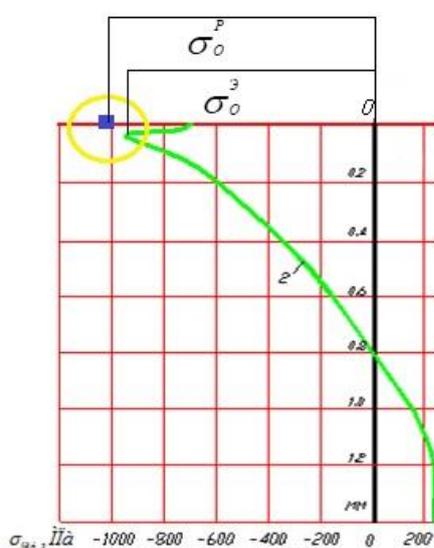


Рис. 3.9.

Экспериментальные и расчетные величины максимальных остаточных сжатых напряжений образцов из стали 30XГСА после ГДУ.

$H_0 - 2300$  МПа

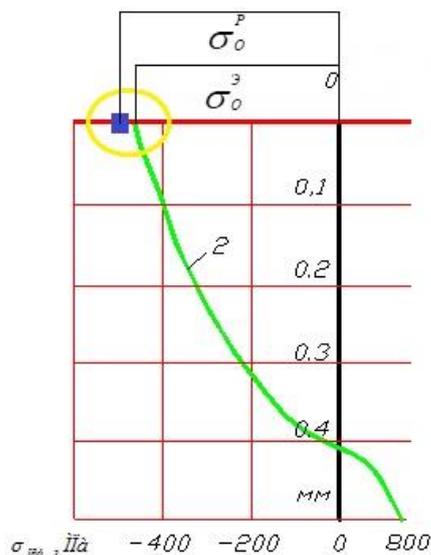


Рис. 3.10.

Экспериментальные и расчетные величины максимальных остаточных сжатых напряжений образцов из стали 30X3BA после ВиУО.

$H_0 - 800$  МПа

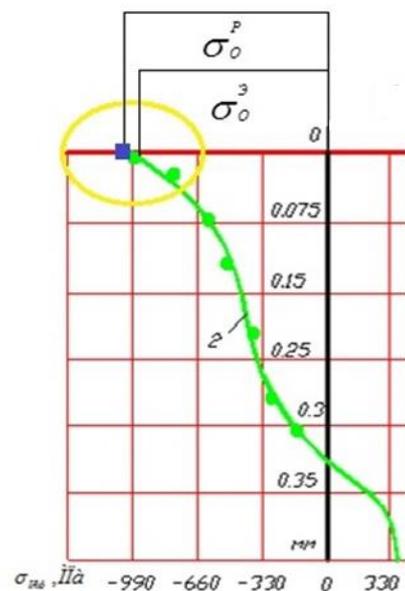


Рис. 3.11.

Экспериментальные и расчетные величины максимальных остаточных сжатых напряжений цилиндрических образцов из жаропрочной стали X12H20T3P после дробеметного упрочнения.

$H_0 - 2300$  МПа

Таблица 3.4

Сравнительный анализ результатов экспериментальных и расчетных значений величины максимальных остаточных, сжимающих напряжений, формируемых в поверхностном слое при виброударной обработке

| Материал образца | Время обработки экспериментальное, мин. | Время обработки расчетное, мин. | Остаточные напряжения эксперимент, Па | Остаточное напряжение, расчет Па | Погрешность δ% |
|------------------|---|---------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------|----------------|
| Сталь 30ХЗВА     | 10-20                                   | 19                              | -490                                  | -504                             | 2,7            |
| сплав ВТ20       | 10-20                                   | 20                              | -680                                  | -630                             | 7,3            |
| Сталь 30ХГСА     | 10-20                                   | 20                              | -980                                  | -1133                            | 13,5           |
| Сталь 30ХЗВА     | 10-20                                   | 19                              | -480                                  | -504                             | 4,7            |
| X12P20E3P        | 10-20                                   | 19                              | -990                                  | -1133                            | 12,6           |

Проведенные исследования показали приемлемость установленных расчетных зависимостей для оценки параметров физико-механических характеристик упрочненного поверхностного слоя динамическими методами ППВ при упрочнении его без разрушения. Расхождения расчетных и экспериментальных результатов находится в диапазоне допустимой экспериментальной ошибки (15 %).

## ГЛАВА 4. ОЦЕНКА УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ДЕТАЛЕЙ, С ПОЗИЦИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОДХОДА

### 4.1. Условие разрушения поверхностного слоя

Поверхностный слой деталей, подвергнутых технологической обработке на формообразующих и отделочных операциях, в результате происшедших в нем микро и субструктурных изменений перед эксплуатацией имеет определенное (не нулевое) энергетическое состояние, которое количественно можно оценить в виде соотношения:

$$U_n \leq E_0 + E_y, \quad (4.1)$$

При эксплуатации в поверхностном слое происходят дополнительные микро и субструктуры изменения, приводящие к приращению его внутренней энергии на величину  $U_e$ . В совокупности  $U = U_n + U_e$  определяют энергетическое состояние локального объема в процессе эксплуатации.

Представим условие разрушения локального объёма твёрдого тела в процессе эксплуатации в виде:

$$U = U_{кр}, \text{ Дж/моль}, \quad (4.2)$$

где  $U$  – изменение энергетического состояния локального объёма, кДж/моль;  $U_{кр}$  – критическое энергетическое состояние локального объёма, предопределяющее его разрушение, кДж/моль.

Используя методологический подход для моделирования механизма изменения энергетического состояния поверхностного слоя в процессе ДППВ, изложенный в главе 2, зависимость, описывающую механизм *изменения* энергетического состояния локального объёма в процессе эксплуатации представим в виде:

$$U = TR \ln(t_p/\tau_0) + k_\phi k_a V_m \sigma \bar{\epsilon} t_p + U_n, \quad \text{Дж/моль}, \quad (4.3)$$

где  $T$  – абсолютная температура условий эксплуатации, К;  $t_p$  – продолжительность эксплуатации до разрушения, с;  $k_\phi$  – коэффициент формы,

$k_{\phi} = \frac{D}{\sigma \bar{\epsilon}}$ , где  $D$  – фактическая необратимая затраченная работа (площадь под кривой «напряжение-деформация»);  $k_a$  – коэффициент учитывающий долю механической энергии в общем балансе работы деформации, накапливаемой в локальном объеме поверхностного слоя затраченной работы  $D$ , по данным [132], для отожженных сталей  $k_a = 0,25 - 0,3$ , для упрочнённых сталей  $k_a = 0,05 - 0,1$ ;  $\sigma$  – эквивалентное напряжение, определяемое характером силового воздействия на локальный объем (статическое, динамическое, циклическое), МПа;  $\bar{\epsilon}$  – средняя скорость неупругой деформации, с<sup>-1</sup>;

В главе 2 было установлено, что величина энергии, накапливаемая в локальном объёме поверхности, при которой зафиксировано начало разрушения поверхности составила 124,23 кДж/моль, которая превышает критерий  $\Delta H$  на величину, равную 84 кДж/моль, соизмеримую с теплотой плавления для исследуемых материалов.

Таким образом, критическое энергетическое состояние локального объёма, предопределяющее его разрушение может быть определено из выражения:

$$U_{кр} = \Delta H + L_{пл}, \text{ Дж/моль}, \quad (4.4)$$

где  $L_{пл}$  – скрытая теплота плавления.

С учётом (4.2) и (4.4) получим энергетическую модель разрушения локального объёма твёрдого тела в процессе эксплуатации:

$$TR \ln(t_p / \tau_0) + k_{\phi} k_a V_m 10^{-6} \sigma \bar{\epsilon} t_p + U_H = \Delta H + L_{пл}, \text{ Дж/моль}, \quad (4.5)$$

По своему содержанию энергетическая модель разрушения (4.5) имеет обобщающий характер, достаточно полно раскрывает энергетическую и кинетическую сущность различных процессов микро и субструктурных изменений и разрушения материалов в процессе их эксплуатации, отражает их феноменологичность и статистичность. Из энергетической модели разрушения (4.5) вытекает энергетическая модель ДППВ, для которой так же свойственны процессы микро и субструктурных изменений.

Кроме того, условие (4.5) позволяет решить ряд актуальных задач по прогнозированию влияния упрочнения ДППВ на эксплуатационные свойства деталей, изготавливаемых из различных по марке и наименованию материалов.

## 4.2. Исследование влияния ППВ на усталостную долговечность

### 4.2.1. Прогнозирование влияния ППВ на усталостную (объёмную) долговечность деталей

При достижении длительности приложения циклической нагрузки, соответствующей времени  $t_p$ , микро и субструктурные изменения в локальном объеме, а следовательно, и пластическая деформация становится критической, для материала, то есть  $\bar{\epsilon}t_p = \epsilon_k - \epsilon_n = \Delta\epsilon_{кр}$ .

Выразив из энергетической модель разрушения (4.5) время до разрушения  $t_p$  получим в общем виде уравнение долговечности:

$$t_p = \tau_0 \exp\left(\frac{\Delta H + L_{пл} - U_n - k_\phi k_a V_m \sigma \Delta\epsilon_{кр}}{RT}\right), \text{ с}, \quad (4.6)$$

Из уравнения (4.6) следует, что усталостная долговечность деталей зависит от: энергетического состояния поверхностного слоя, полученного на стадии изготовления детали; степени его напряжённости, обусловленной характером внешнего силового воздействия на него; критической величины относительной пластической деформации для соответствующего условиям эксплуатации состояния материала.

При воздействии на деталь знакопеременных нагрузок степень напряжённости локального объёма поверхностного слоя определяется амплитудой циклических напряжений, т. е.  $\sigma = \sigma_a$ . При динамическом силовом воздействии на поверхностный слой степень напряжённости локального объёма поверхностного слоя определяется величиной напряжения, возникающего в зоне локального силового контакта.

Для оценки относительной пластической деформации в процессе эксплуатации используем твердость, которая, как показано в главе 3 очень хорошо коррелирует и зависит от энергетического состояния поверхностного слоя. Это позволяет сделать следующие допущения: для упрочнённых ДППВ поверхностных слоёв –  $\varepsilon_{кр.}^{упр.} = \frac{HV_{max}}{HV_{пс}^*}$ ; а для неупрочнённых ДППВ перед эксплуатацией поверхностей –  $\varepsilon_{кр.}^0 = \frac{HV_{max}}{HV}$ .

На основе (4.6) уравнения для оценки усталостной (объёмной) долговечности деталей будут иметь вид:

– для упрочнённых ДППВ:

$$t_p^{упр.} = \tau_0 \exp\left(\frac{L_{пл} - \bar{k}_\phi k_a V_m \sigma_a \frac{HV_{max}}{HV_{пс}^*}}{RT}\right), \text{ с}, \quad (4.7)$$

– для неупрочнённых ДППВ:

$$t_p^0 = \tau_0 \exp\left(\frac{\Delta H + L_{пл} - E_0 - k_\phi k_a V_m \frac{\sigma_a HV_{max}}{HV}}{RT}\right), \text{ с}, \quad (4.8)$$

где  $HV_{max}$  – максимальная микротвердость, характеризующая предельные микро и субструктурные изменения в локального микрообъеме приводящие к его разрушению; для расчетов  $HV_{max}$  можно принять на уровне твердости поверхности закаленной стали;  $\bar{k}_\phi$ ,  $k_\phi$  коэффициенты формы под кривой «напряжение-деформация» упрочненной и неупрочненной поверхности.

Количественно влияние методов ДППВ инденторами на усталостную прочность деталей можно оценить посредством коэффициента  $K_V$ , представляющего собой отношение пределов выносливости упрочнённых ППВ  $\sigma_{-1}^{упр.}$  и исходных деталей  $\sigma_{-1}^{исх.}$ .

Допустив, что  $K_V = \frac{\sigma_{-1}^{упр.}}{\sigma_{-1}^{исх.}} = \frac{t_p^{упр.}}{t_p^0}$ , получим выражение для определения

максимальной величины коэффициента  $K_V$  в виде:

$$K_V = \exp\left(\frac{\sigma_a k_a HV_{max} V_m 10^{-6} \left(\frac{k_\phi}{HV} - \frac{\bar{k}_\phi}{HV_{пс}^*}\right) - \Delta H + E_0}{RT}\right). \quad (4.9)$$

#### 4.2.2. Экспериментальное обоснование методов оценки усталостной долговечности деталей

Методика экспериментальных исследований. Целью настоящих экспериментальных исследований являлось экспериментальное подтверждение расчетных зависимостей по оценке влияния методов ДППВ на повышение усталостной долговечности деталей.

Проверка адекватности расчётных зависимостей проводилась в следующей последовательности:

1. На основе анализа научно-технической литературы, посвященной динамическим методам ППВ, выбирались результаты экспериментальных исследований по оценке влияния методов ППВ на повышение усталостной долговечности поверхностного слоя.

Кроме того, проводились дополнительные экспериментальные исследования по установлению вышеуказанных зависимостей для образцов, упрочненных виброударным способом, с использованием технических средств, представленных в данном разделе.

2. Для выбранных экспериментальных исследований проводилась оценка повышения усталостной долговечности по следующим расчетно-аналитическим зависимостям:

$$K_V = \exp\left(\frac{\sigma_a 10^{-6} \left(k_\phi k_a V_m \frac{HV_{пс}}{HV} - \overline{k_\phi k_a V_m}\right) - \Delta H + E_0}{RT}\right).$$

3. Проводился сравнительный анализ экспериментальных и расчетных коэффициентов повышения усталостной долговечности и определялась погрешность по формуле:

$$\delta = \frac{K_{Vэ} - K_{Vр}}{K_{Vэ}} \times 100\% .$$

4. По результатам проведенных исследований делались соответствующие выводы.

Экспериментальные исследования проводились на установке У-20, предназначенной для испытания цилиндрических образцов с диаметром рабочего сечения 8–16 мм на поперечный изгиб при вращении и консольном нагружении, а также плоских (призматических) образцов на поперечный изгиб в одной плоскости. Основные технические характеристики установки для усталостных испытаний приведены в табл. 4.1.



Рис. 4.1. Установка для усталостных испытаний У-20

Образцы для усталостных испытаний (рис. 4.2), изготавливались из материала Сталь20, алюминиевого сплава Д16Т в количестве 10 шт. для каждого материала.

## Технические характеристики установки для усталостных испытаний У–20

| Наименование                               | Единица измерения | Значения параметров      |
|--|-------------------|--------------------------|
| Диапазон прикладываемых нагрузок           | Н                 | 50–1000                  |
| Дискретность приложения нагрузки           | Н                 | 2,5                      |
| Наибольшая частота нагружения              | циклов/мин        | 1500                     |
| Тип цикла нагружения                       | –                 | Симметричный             |
| Амплитуда колебаний плоских образцов       | мм                | 0–10                     |
| Тип считывания циклов                      | –                 | Механический от привода  |
| Пределы измерения счётчика                 | циклов            | $100 \div 9 \times 10^7$ |
| Габаритные размеры (длина, ширина, высота) | м                 | 1,0×0,5×1,0              |
| Масса                                      | кг                | 300                      |

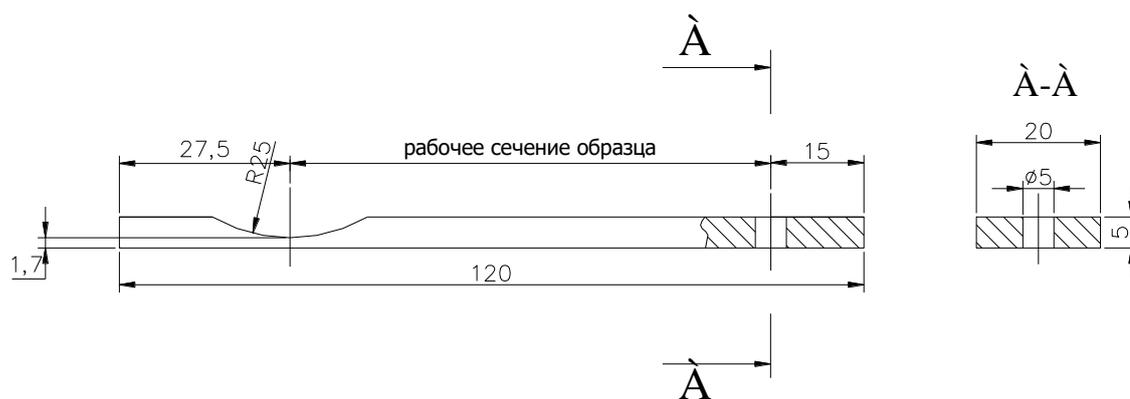


Рис. 4.2. Образцы для испытания на усталость

## Механические характеристики образцов

| Наименование материала | Предел прочности<br>$\sigma_B$ , МПа | Твёрдость<br>HV,<br>МПа | Предел текучести<br>$\sigma_T$ , МПа | Предел усталости<br>$\sigma_{-1}$ , МПа |
|------------------------|--------------------------------------|-------------------------|--------------------------------------|---|
| Сталь 20               | 400                                  | 1400                    | 220                                  | 210                                     |
| Д16Т                   | 345                                  | 1200                    | 252                                  | 224                                     |

Перед испытанием образцы упрочнялись на установке УВГ 4х10, стальными шариками ШХ–15 диаметром 6 мм при следующих режимах:  $A = 3$  мм,  $F = 33$  Гц,  $T = 20$  мин (Сталь 20),  $T = 20$  мин (Д16Т).

### 4.2.3. Результаты исследований

В таблице. 4.3. приведены результаты экспериментальных исследований, которые показали:

- после виброударного ППВ образцов из стали 20 в среде стальных шаров ШХ–15 при амплитуде колебаний  $A = 3$  мм, частоте  $f = 33$  Гц в течение 15 мин усталостная прочность повысилась в 1,27; расчётное значение коэффициента упрочнения составило  $K_{Vp} = 1,126$ ;

- после виброударного ППВ образцов из алюминиевого сплава Д16Т на тех же режимах в течение 20 мин усталостная прочность образцов повысилась соответственно в 1,32 раза.; расчётные значения коэффициентов упрочнения составили 1,104.

- значения коэффициента  $K_{V3}$ , полученные экспериментальным путем, выше, чем расчётным  $K_{Vp}$ . Вместе с тем близость их в пределах 11–17 % подтверждает целесообразность использования полученной зависимости (4.5) для оценки усталостной долговечности деталей упрочнённых ДППВ.

Сравнительный анализ расчетных и экспериментальных данных влияния виброударной обработки на повышение усталостной долговечности образцов

| Материал образцов | Режимы виброударного упрочнения   | Амплитуда циклического нагружения $\sigma_a$ | Усталостная долговечность эксперимент $K_{V_s}$ | Усталостная долговечность расчетная $K_{V_p}$ | Погрешность $\delta\%$ |
|-------------------|---|--|---|---|------------------------|
| Сталь 20          | Амплитуда-3мм, частота-33Гц., время обработки- 60 мин., рабочая среда-шарики из ШХ-15 | $0,7\sigma_B$                                | 1,27  | 1,126   | 11,34                  |
| Д16Т              | Амплитуда-3мм, частота-33Гц., время обработки- 30 мин., рабочая среда-шарики из ШХ-15 | $0,7\sigma_B$                                | 1,32  | 1,104   | 16,36                  |

Ниже приведен сравнительный анализ коэффициента  $K_{V_p}$  с данными, полученными из литературных источников. Результаты сравнительного анализа приведены в табл. 4.4.

В работе [97] исследовалось повышение усталостной долговечности образцов после гидродробеструйной обработки (ГДУ). Обработке подвергались плоские образцы размером  $100 \times 20 \times 4$  из быстрорежущей стали Р18. После упрочнения при заданных режимах обработки (диаметр дроби –2,5 мм, время обработки – 4 мин, давление жидкости – 0,4 МПа) долговечность образцов повысилась на 40 %, т. е. в 1,42 раза; расчетное значение,  $K_{V_p} = 1,608$ .

Испытания цилиндрических образцов диаметром 10,5 мм из стали 30ХГСА [97] после упрочнения ГДУ стальными шариками диаметром 2,5 мм при давлении рабочей жидкости 0,2 МПа показали повышение усталостной долговечности в 1,36 раз; расчетное значение,  $K_{V_p} = 1,485$ .

В работе [75] приведены результаты испытания на усталость плоских образцов  $125 \times 20 \times 5$  мм из стали 40Х и алюминиевого сплава Д16Т, упрочнённых виброударной обработкой (ВиУИО). Образцы упрочнялись в течение 8 мин при

трёхслойной загрузке рабочей среды со скоростью обработки 4 м/с. В качестве рабочей среды применялись стальные и алюминиевые шарики диаметром  $D = 6$  мм. Обработка при таких режимах позволила повысить усталостную прочность алюминиевых образцов Д16Т в 1,29 раза, стальных (сталь 40Х) – в 1,36 раза; расчетные значения  $K_{Vp} = 1,185$ ,  $K_{Vp} = 1,245$  соответственно.

Согласно [75] после виброударной обработки (ВиУО) образцов из стали 30Х3ВА в течение 10 мин при амплитуде 2,5 мм предел усталости по сравнению с исходным повысился в 1,27 раза.; расчетное значение,  $K_{Vp} = 1,192$ .

В работе [83] показано, что после упрочнения цилиндрических образцов диаметром 10,5 мм из стали 20Х2Н4А комбинированным способом (наклёп дробью нитроцементованных слоёв глубиной 0,9 мм) усталостная прочность повысилась в 1,23 раза.; расчётное значение  $K_{Vp} = 1,196$ .

При упрочнении цилиндрических образцов диаметром 10 мм из жаропрочной стали Х12Н20Т3Р дробеметным методом (скорость упрочнения 4,5 м/с, время обработки 4 мин), согласно [112], предел усталости этих образцов увеличился на 220 % по сравнению с исходным значением. Расчетное значение  $K_{Vp} = 2,025$ .

На основе проведённых экспериментальных исследований установлено, что предложенная расчетная зависимость (4.9) позволяет с достаточной для практики точностью (в пределах 3–16 %) оценивать эффективность влияния упрочнения методами ППВ на повышение усталостной долговечности. Расхождение расчётных и экспериментальных значений обусловлено многофакторностью процесса пластической деформации, микро и субструктурных изменений и разрушения твердых тел, учесть которые в полной мере в модели не представляется возможным.

Результаты сравнительного анализа влияния методов ДППВ усталостную долговечность образцов

| Метод обработки | Материал образцов | Амплитуда циклического нагружения $\sigma_a$ , МПа | Усталостная долговечность расчетная $K_{Vp}$ | Усталостная долговечность эксперимент $K_{V_3}$ | Погрешность $\delta\%$ | Источник |
|-----------------|-------------------|--|--|---|------------------------|----------|
| ВиУО            | 30Х3ВА            | 450  | 1,212  | 1,17-1,49                                       | 6,89                   | [4]      |
| ГДУ             | P18               | 1470   | 1,608  | 1,25-1,65                                       | 14,86                  | [97]     |
|                 | 30ХГСА            | 700  | 1,485  | 1,26-1,63                                       | 9,19                   | [97]     |
| ВиУИО           | Сталь 40Х         | 570  | 1,245  | 1,13-1,40                                       | 8,46                   | [75]     |
| Дробеметный     | X12H20T3 P        | 990  | 2,025  | 1,90-2,60                                       | 15,62                  | [112]    |
| Дробеструйный   | 20Х2Н4А           | 760  | 1,196  | 1,15-1,42                                       | 2,76                   | [112]    |

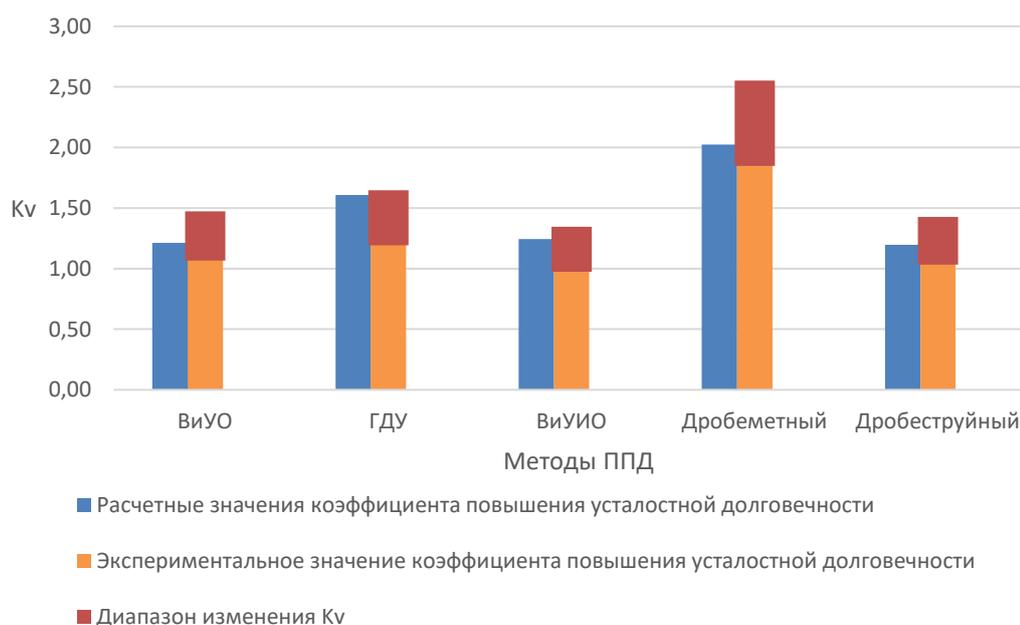


Рис. 4.3. Сравнение расчетных и экспериментальных данных изменения усталостной долговечности при динамических методах ППВ

#### **Выводы к главе 4.**

1. Предложенное энергетическое условие разрушения поверхностного слоя в процессе циклического нагружения, раскрывающая влияние упрочнения на усталостную долговечность деталей.
2. В качестве критерия, определяющего разрушение металла в условиях силовых факторов эксплуатации, может быть принята величина предельной энергии, поглощаемой кристаллической решёткой при нагреве до температуры плавления.
3. Получена зависимость для прогнозирования долговечности детали, упроченных динамическими ППВ, в процессе эксплуатации.
4. Количественно влияние методов ППВ свободнодвижущимися инденторами на усталостную прочность деталей можно оценить посредством коэффициента  $K_v$ , представляющего собой отношение пределов выносливости упрочнённых ППВ и исходных деталей.
5. Подтверждена адекватность расчетных зависимостей по оценке влияния усталочной долговечности деталей упроченных динамическими методами ППВ, допустимая погрешность не превышает величину экспериментальной ошибки.

## **ГЛАВА 5. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОПЕРАЦИЙ ОБРАБОТКИ ДИНАМИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ ППВ И ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ**

### **5.1. Методика расчёта технологических режимов ППВ и параметров качества поверхности**

Представленные во 2–4 главах результаты теоретических и экспериментальных исследований позволили получить структурно-энергетическую модель изменения внутренней энергии поверхностного слоя как в процессе ППВ динамическими методами, так и при эксплуатации деталей; обосновать энергетический критерий эффективности упрочнения ППВ, обеспечивающий наибольшее повышение усталостной прочности деталей в процессе их знакопеременного циклического нагружения, а также установить на его основе расчётные зависимости для определения параметров качества модифицированного в процессе ППВ поверхностного слоя и прогнозирования влияния ППВ на повышение эксплуатационных свойств деталей машин. Подтверждённая экспериментальными исследованиями адекватность предложенных моделей является методологической основой для проектирования технологических операций упрочнения динамическими методами ППВ.

Исследования, проведенные в данной работе, позволяют целенаправленно подойти к решению данного вопроса с точки зрения достижения наиболее эффективного упрочнения поверхностного слоя по таким показателям, как усталостная прочность, глубина упрочнения, остаточные напряжения, а также прогнозирования наиболее эффективных методов обработки и производительности процесса, основываясь на энергетическом подходе к оценке качества поверхностного слоя. В табл. 5.1 предложена методика расчёта параметров качества поверхностного слоя и оценка

усталостной прочности детали, подвергаемой упрочнению динамическими методами ППВ.

Таблица 5.1

Последовательность расчёта параметров качества поверхностного слоя и оценка усталостной прочности детали

| № этап а | Содержание этапа       | Расчётная зависимость  | Номер формулы (уточнение) |
|----------|------------------------|--|---------------------------|
| 1        | Анализ исходных данных | <p><u>Об обрабатываемой детали:</u><br/> материал детали;<br/> <math>HV</math> – твердость материала по Виккерсу, ГПа;<br/> <math>R_a</math> – среднее арифметическое отклонение профиля исходной поверхности, мкм;<br/> <math>b, v</math> – параметры опорной кривой микропрофиля исходной поверхности;<br/> <math>T_{пл}</math> – температура плавления материала, К;<br/> <math>T_{исх}</math> – температура при 293 °К;<br/> <math>C</math> – теплоемкость материала детали, дж/кг*К;<br/> <math>E_0</math> – внутренняя энергия поверхностного слоя до ППВ, Дж;<br/> <math>V_m</math> – мольный объем материала;<br/> <math>R</math> – постоянная Больцмана, 0,008314 Дж/К·кмоль;<br/> <math>G</math> – модуль сдвига, МПа;<br/> <math>m_d</math> – масса детали, кг;<br/> <math>V_d</math> – объём детали, дм<sup>3</sup>;<br/> <math>\sigma_T</math> – предел текучести, МПа;<br/> <math>n</math> – коэффициент восстановления;<br/> <math>\xi</math> – коэффициент податливости материала, мм/кг.</p> <p><u>О вибростанке:</u><br/> – предельно допустимые по конструктивным соображениям частота <math>f_{max}</math>(Гц) и амплитуда <math>A_{max}</math>(мм);<br/> – диапазон регулирования частот и амплитуд; если они задаются дискретно, то значения рабочих частот и амплитуд;<br/> – рабочий объём контейнера <math>V_k</math> (дм<sup>3</sup>)</p> <p><u>Об обрабатывающей среде:</u></p> | [26, 53,65, 85,102, 122]  |

|   |   |   |                |
|---|---|---|----------------|
|   |   | <p>вид среды;<br/> D – диаметр частицы обрабатываемой среды, мм;<br/> <math>\rho_{\text{ср}}</math> – насыпной вес среды, кг/дм<sup>3</sup>;<br/> <math>m_{\text{ч}}</math> – масса частицы, кг.<br/> <u>Условия обработки:</u><br/> <math>\sigma</math> – интенсивность напряжения динамического воздействия, МПа;<br/> T – температура внешней среды, К</p> |                |
| 2 | Энергетический критерий эффективности ППВ, Дж/моль                          | $\Delta H = \int_{T_{\text{исх}}}^{T_{\text{пл}}} C dT$   | Раздел 1.3[75] |
| 3 | Скорость части рабочей среды, м/с   | $V = 2k_{\text{д}}\pi Af, k_{\text{д}} \approx 0,8 - 0,9$   | [4]            |
| 4 | Энергия частиц обрабатываемой среды, Дж                                     | $E = \frac{m_{\text{ч}}v^2}{2}$   |                |
| 5 | Диаметр пластического отпечатка, мм   | $d_{\text{к}} = \sqrt[4]{\frac{6 E_{\text{y}}D}{HV}}$   | [66]           |
| 6 | Определение минимальной скорости контактного взаимодействия инденторов, м/с | $V_{\text{min}} = \frac{R_z D \pi \frac{v}{v+1} C \sigma_{\text{T}} \chi}{K_M} \left( \frac{0,477}{b} \right)^{\frac{1}{v}} \cdot \frac{(v-1)^{\frac{v-1}{2v}}}{2v}$  | [75]           |
| 7 | Предельно допустимое количество   | $i_{\text{np}} = 4,8 \tau_0 \cdot V/d_{\text{к}} \exp \left( \frac{\Delta H - E_0 - k_{\sigma} k_{\text{н}} V_m \sigma \sqrt[4]{\frac{3m_{\Sigma} \cdot k_{\text{д}} \cdot V^2}{HV \cdot D^3}}}{TR} \right)$  | 3.4            |

|    |   |   |      |
|----|---|---|------|
|    | циклов ударно-импульсного воздействия                             |   |      |
| 8  | Энергетический коэффициент  | $K_{\text{пр}} = \frac{0,067^2}{6G} V_m$  | 3.10 |
| 9  | Предельная твёрдость поверхностного слоя, МПа                     | $HV_{\text{пс}}^* = \sqrt{\Delta H / K_{\text{пр}}}$  | 3.13 |
| 10 | Глубина упрочненного слоя, мм                                     | $h_{\text{н}}^* = 0,45 \sqrt[3]{\vartheta \left( \frac{[\Delta H / K_{\text{пр}}]^{0,5} - HV_{\text{исх}}}{HV_{\text{исх}}} \right)}$                                 | 3.16 |
| 11 | Величина остаточных сжимающих напряжений поверхностного слоя, МПа | $\sigma_o^* \approx -0,067 \left[ \sqrt{\Delta H / K_{\text{пр}}} \right]$  | 3.18 |
| 12 | Коэффициент повышения усталостной долговечности                   | $K_V = \exp \left( \frac{\sigma_a k_a HV_{\text{max}} V_m \left( \frac{k_{\phi}}{HV} - \frac{\bar{k}_{\phi}}{HV_{\text{пс}}^*} \right) - \Delta H + E_0}{RT} \right)$ | 4.9  |
| 13 | Вероятность формирования пластического отпечатка на поверхности   | $P \approx 0,6 - 0,7$   | [4]  |

|    |   |  |     |
|----|---|--|-----|
| 14 | Количество<br>одновременно<br>обрабатываемых<br>деталей<br>(принимается,<br>рассчитывается),<br>шт. | $N = \frac{2\rho_{cp} V_k}{3(1,5m_d + \rho_{cp} V_d)}$ |     |
| 15 | Количество<br>массы среды,<br>загружаемой в<br>камеру, кг   | $M_{cp} = 1.5 * N * m_d.$                              |     |
| 16 | Продолительно<br>сть обработки, с   | $\tau_{обр} = \frac{i^*}{Pf}$                          | [4] |
| 17 | Производительн<br>ость<br>обработки, шт/с   | $П = \frac{N}{\tau_{обр}}$                             |     |

## 5.2. Проектирование операций упрочняющей обработки методом поверхностного пластического воздействия

Алгоритм проектирования операций упрочняющей обработки методом ППВ:

1. Анализ исходных данных для проектирования, которыми являются:

а) конструктивные параметры упрочняемой детали: её геометрическое и размерное описание, материал и механические свойства (твёрдость, предел прочности, динамический предел текучести и т. д.), вес, требуемые эксплуатационные показатели;

б) технологические ограничения на операцию: требуемые показатели качества поверхности; технические ограничения станка;

в) организационно-экономические ограничения: ожидаемые производительность и себестоимость и при необходимости санитарно-гигиенические и экологические ограничения;

г) эксплуатационные требования к детали: усталостной долговечности, повышение износостойкости;

д) гранулометрические параметры и материал обрабатываемой среды.

2. Ввод варьируемых технологических параметров устройства, обеспечивающего упрочняющую обработку детали; для виброударной обработки: частота и амплитуда колебаний.

3. Оператор 3 определяет предельную плотность внутренней энергии обрабатываемого материала.

4. Оператор 4 осуществляет расчёт эффективной массы инденторов и количества деталей, загружаемых в рабочую камеру устройства, исходя из условия, что масса инденторов должна быть в 1,5 раза больше массы загружаемых деталей, при этом общий объем загрузки не должен превышать  $2/3$  объема рабочей камеры; эти условия обязательны для обеспечения эффекта упрочнения и стационарного циркуляционного движения объема загрузки в процессе обработки.

5. Подсистема 5 определяет энергетическое состояние инденторов и их энергосиловые характеристики ударно-импульсного воздействия на поверхность обрабатываемого материала.

6. Оператор 6 оценивает энергетическое состояние инденторов с позиции достаточности усилия ударно-импульсного воздействия для развития пластической деформации в зоне контактного взаимодействия индентора с поверхностью обрабатываемого материала и, как следствие, получения упрочняющего эффекта. В случае недостаточности подаётся команда оператору 2 для изменения варьируемых технологических параметров. При соблюдении условия происходит переход к подсистеме 7.

7. В рамках подсистемы 7 осуществляется расчёт физико-механических параметров качества упрочнённого поверхностного слоя, таких как предельная

твёрдость поверхностного слоя, глубина упрочненного слоя, величина остаточных сжимающих напряжений поверхностного слоя.

8. Оператор 8 введен в программу расчёта, если при осуществлении упрочняющей обработки предусмотрены требования по качеству поверхности, которые могут выступать в качестве критериев обработки.

9. В рамках подсистемы 9 осуществляется оценка повышения эксплуатационных свойств детали, таких как усталостная долговечность или усталостная износостойкость.

10. Оператор 10 введен в программу расчёта, если при осуществлении упрочняющей обработки предусмотрены требования по эксплуатационным свойствам детали, которые могут выступать в качестве критериев обработки.

11. Подсистема 8 производит расчёт продолжительности упрочняющей обработки методами ППВ.

12. Оператор 9 предусматривает обеспечение требуемой по условиям производства конкретных деталей производительности обработки.

13. По результатам проведенных в рамках предложенной программы расчётов оператор 10 выполняет выход на печать наиболее рациональных технологических параметров операции упрочняющей обработки деталей методом ППВ, а также соответствующих ему физико-механических параметров качества поверхности и повышения эксплуатационных свойств (рис. 5.1).

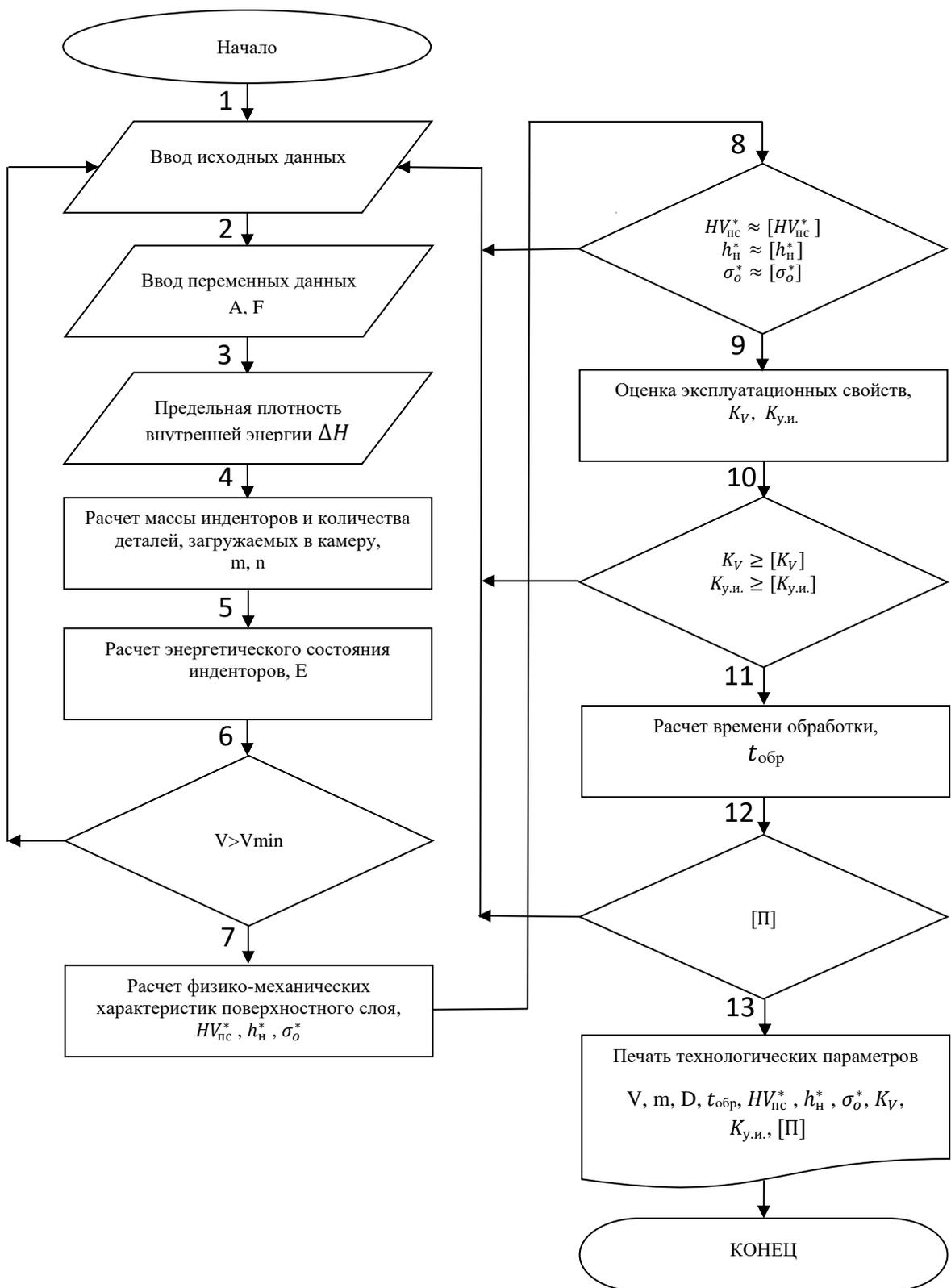


Рис. 5.1. Блок-схема определения наиболее рациональных технологических параметров операции упрочняющей обработки деталей методом ППВ, а также соответствующих ему физико-механических параметров качества поверхности и повышения эксплуатационных свойств

### 5.3. Практическое применение результатов исследования

Предложенная методика достаточно универсальна, так как позволяет оптимизировать упрочняющие операции с применением различных динамических методов ППВ. Полученные в результате исследований расчетно-аналитические модели дают возможность обосновать оптимальную производительность процесса, а также оценить физико-механические параметры качества, формируемые в процессе упрочняющей обработки, и их влияние на повышение эксплуатационных свойств детали. Данную методику можно рекомендовать к применению не только для дальнейших научных разработок, но и для выбора наиболее эффективных технологических режимов существующих и проектируемых производственных процессов, связанных с упрочнением деталей методами ППВ.

Результаты диссертационного исследования рекомендованы ООО РТЦ «Технология» г. Азов для обоснования режимов эффективного виброударного упрочнения деталей.

На ООО РТЦ «Технология» объектом применения предложенной методики являлись технологии изготовления колеса зубчатого и промежуточного вала. На основании методики с использованием программы Smath Studio произведен выбор эффективных режимов обработки, и разработаны регламенты вибрационно-ударного упрочнения поверхностей зубьев зубчатого колеса и промежуточного вала, обеспечивающих повышение эксплуатационных свойств этих деталей в 1,2 раза. Разработанные аналитические зависимости по оценке физико-механических характеристик качества поверхностного слоя и эксплуатационных свойств деталей рекомендованы для включения в инструкции по конструкторско-технологической подготовке производства изделий.

#### **5.4. Дальнейшее развитие результатов диссертационного исследования**

- 1.Продолжить исследование энергетического оценки для повышения эксплуатационных свойств из различных материалов упрочнённых методами ППВ.
- 2.Исследование приемлемости результатов диссертационного исследования для статических методов ППВ.
- 3.Применение результатов диссертационного исследования при использовании динамических методов для нанесения покрытий.

#### **Выводы по главе 5.**

1. Разработана методика расчёта технологических режимов ППВ и параметров качества поверхности;
2. Приведен алгоритм проектирования операций упрочняющей обработки методом ППВ;
3. Результаты исследования апробированы ООО РТЦ «Технология» г. Азов для обоснования режимов эффективного виброударного упрочнения деталей;
4. Разработанная методика расчёта параметров качества поверхности позволяет с использованием ЭВМ выбирать рациональные технологические режимы операций упрочнения динамическими методами ППВ;
- 5.Определены дальнейшие перспективы развития диссертационного исследования.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований разработаны энергетические методы оценки параметров качества поверхностного слоя и прогнозирования эксплуатационных свойств деталей, подкрепленные результатами экспериментальных исследований и обеспечивающие разработку рациональных технологий упрочнения динамическими методами ППВ.

Основные результаты диссертационной работы состоят в следующем:

1. Разработанная энергетическая модель упрочнения научно обосновывает влияние технологических параметров и условий обработки на изменение энергетического состояния поверхностного слоя модифицированного в процессе ППВ динамическими методами.

2. Экспериментально доказано, что элемент пластически деформируемого материала считается предельно упрочненным, когда рост его внутренней энергии достигает величины равной разности теплосодержания (энтальпии) при температуре плавления и исходном состоянии.

3. Установленные на основе энергетического критерия расчетные зависимости позволяют (с погрешностью 14%) определить физико-механические параметры качества поверхностного слоя упрочнённого динамическими методами ППВ и обосновать производительность процесса обработки.

4. Подтверждена гипотеза о возможности использования в качестве энергетической величины, определяющей разрушение металла в условиях циклического нагружения, величины соизмеримой с предельной энергией поглощаемой кристаллической решёткой при нагреве локального микрообъема при температуре плавления.

5. Предложенное энергетическое условие разрушения поверхностного слоя и полученная на его основе расчетная зависимость в процессе циклического нагружения позволяет (с погрешностью 20%) прогнозировать влияния упрочнения динамическими методами ППВ на эксплуатационные свойства деталей.

6. Разработанная методика расчёта параметров качества поверхности позволяет с использованием ЭВМ выбирать рациональные технологические режимы операций упрочнения динамическими методами ППВ.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 24217-80. Машины для испытания металлов на усталость. Типы. Основные параметры. Издательство стандартов. 1980.
2. ГОСТ 25.502-79. Методы испытаний на усталость. Издательство стандартов. 1979.
3. ГОСТ 25507-85. Методы испытаний на усталость при эксплуатационных режимах нагружения. Издательство стандартов. 1985.
4. ГОСТ 28840-90. Машины для испытания материалов на усталость. Общие технические требования. Издательство стандартов. 1990.
5. ГОСТ 8296-72. Обработка поверхностным пластическим деформированием. Термины и определения. Издательство стандартов. 1972.
6. Аверченков В.И. Конструкторско-технологическое обеспечение износостойкости деталей машин в САПР // Технологическое обеспечение повышения качества и долговечности деталей машин и механизмов. Брянск: БИТМ, 1985. С.112–118.
7. Аксёнов В.Н. Совершенствование процесса отделочно-упрочняющей обработки многоконтактным виброударным инструментом с учётом ударно-волновых явлений: дис. ... канд. техн. наук. Ростов н/Д, 2000.
8. Бабицкий В.И. Теория виброударных систем. Приближенные методы. М.: Наука, 1978. 352 с.
9. Бабичев А.П., Бабичев И.А. Основы вибрационной технологии. Ростов н/Д, 1999. 620 с.
10. Бабичев А.П., Мотренко П.Д. Отделочно-упрочняющая обработка деталей многоконтактным виброударным инструментом. Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2003. 192 с.
11. Бабичев А.П. Теоретико-вероятностная схема процесса виброобработки и её применение к решению задач о продолжительности виброобработки / А.П. Бабичев, Н.Т. Мишняков // Интенсификация и контроль технологических параметров сельхозмашиностроения: сб. статей. Ростов н/Д, 1977.

12. Балтер М.А. Влияние структуры стали на её усталостную прочность после поверхностного пластического деформирования / Исследования по упрочнению деталей машин. М.: Машиностроение, 1972. 328 с.
13. Балтер М.А. Упрочнение деталей машин. М.: Машиностроение, 1978. 184 с.
14. Батуев Г.С. Инженерные методы исследования ударных процессов / Г.С. Батуев, Ю.В. Голубков, А.К. Ефремов и др. М.: Машиностроение, 1977. 240 с.
15. Бернер Р., Конмюллер Г. Пластическая деформация монокристаллов. М.: Мир, 1969. 265 с.
16. Биргер И.А. Остаточные напряжения. М.: Машгиз, 1968. 232 с.
17. Блехман И.И. Вибрационное перемещение. М.: Наука, 1968. 465 с.
18. Блюменштейн В.Ю. Научные основы технологии машиностроения: учебное пособие. Кемерово: КузГТУ, 2011. 232 с.
19. Бойцов А.Г. Упрочнение поверхностей деталей комбинированными способами. М.: Машиностроение, 1991. 143 с.
20. Болдырев А.И., Смоленцев В.П., Бородкин В.В. Основы технологии машиностроения: учебное пособие. Воронеж: Воронежский государственный технический университет, 2010. 192 с.
21. Болдырев А.И., Тришина Т.В. Энергетический анализ создания поверхностного слоя с заданными эксплуатационными свойствами // Новые процессы получения и обработки металлических материалов: мат. совещ. Воронеж: АН СССР, 1990. С. 46–48.
22. Большанина М.А. Исследования по физике твердого тела. М.: Изд-во АН СССР, 1957. 422 с.
23. Бутенко В.И. Локальная отделочно-упрочняющая обработка поверхностей деталей машин. Таганрог: ТРТУ, 2006. 126 с.
24. Васильев В.С. Оценка степени пластической деформации поверхностного слоя по твердости / Труды Моск. авиац. ин-та, 1972. Вып. 257. С. 45–51.

25. Васильева А.Г. Деформационное упрочнение закалённых конструкционных сталей. М.: Машиностроение, 1981. 231 с.
26. Вибрации в технике: справочник. М.: Машиностроение, 1981. Т. 6. 456 с.; Т.4. 510 с.
27. Виноградов В.Н., Сорокин Г.М., Албагачиев А.Ю. изнашивание при ударе. М.: Машиностроение, 1982. 192 с.
28. Генкин Н.Д., Рыжов М.А., Рыжов Н.М. Повышение надёжности тяжело нагруженных зубчатых передач. М.: Машиностроение, 1981. 232 с.
29. Герцрикен С.Д. Физические основы прочности и пластичности металлов. М., 1963. 264 с.
30. Гончаревич И.Ф. Вибрация – нестандартный путь. М.: Наука, 1986. 207 с.
31. Гончаревич И.Ф., Фролов К.В. Теория вибрационной техники и технологии. М.: Наука, 1981. 319 с.
32. Григорович В.К. Твердость и микротвердость металлов. М.: издательство «Наука», 1976. 213 с.
33. Демкин Н.Б., Рыжов Э.В. Качество поверхности и контакт деталей машин. М.: Машиностроение, 1981. 244 с.
34. Дрозд М.С., Шевченко А.В. Исследование деформаций металла при ППВ стальных деталей // Повышение циклической прочности материалов методами ППВ: сб. ст. Пермь: ППИ, 1974. С. 15–16.
35. Дрозд М.С., Фёдоров А.В., Лебский С.А. Выбор режимов дробеструйной обработки, обеспечивающих заданные параметры наклёпанного слоя // Вестник машиностроения. 1977. № 3. С.42–45.
36. Дьяченко Е.А. Повышение эффективности вибрационной обработки с учётом экологических характеристик: дис. ... канд. техн. наук. Ростов н/Д, 2004. 186 с.
37. Елизаветин М.А., Сатель З.А. Технологические способы повышения долговечности машин. М.: Машиностроение, 1969. 399 с.

38. Зайдес С.А. Новые способы поверхностного пластического деформирования при изготовлении деталей машин // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. Магнитогорск, 2019. № 3. С. 129–139.
39. Ибатуллин И.Д. Моделирование изнашивания и оценка кинематических параметров разрушения материалов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Самара, 1998. 178 с.
40. Иванов В.В. Вибрационные механохимические методы нанесения покрытий: монография. Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2007. 140 с.
41. Иванов В.В., Крупеня Е.Ю., Бежан В.Е. Покрытие в условиях виброобработки // Вопросы вибрационной технологии: межвуз. сб. науч. ст. Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2005. С. 61–64.
42. Иванова В.С. Усталостное разрушение металлов. М.: Metallurgizdat, 1963. 272 с.
43. Ильин Н.Н. Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин на основе выбора способов отделочно-упрочняющей обработки по критерию работоспособности сопряженных поверхностных слоев: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М., 1994.
44. Каледин Б.А., Чепа П.А. Повышение долговечности деталей поверхностным пластическим деформированием. Минск: Наука и техника, 1974.
45. Калмыков М.А., Струтинский В.Б. К вопросу моделирования процессов, протекающих при вибрационной обработке деталей // Вопросы вибрационной технологии: межвуз сб. науч. работ. Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2009. С. 39.
46. Кендалл М., Морван П. Геометрические вероятности. М.: Физматгиз, 1974.
47. Киричек А.В., Афонин А.Н., Апальков А.Г. Моделирование процесса поверхностно-объемного пластического деформирования // Упрочняющие технологии и покрытия. 2007. № 10. С. 29–31.

48. Киричек А.В., Соловьев Д.Л. Моделирование процесса поверхностно-объемного пластического деформирования // Упрочняющие технологии и покрытия. 2007. № 10. С. 5–8.
49. Кобрин М.М. Эпюры остаточных напряжений при поверхностном пластическом деформировании / Упрочнение деталей машин механическим наклёпыванием. М.: Наука, 1965. С.127–134.
50. Кобринский А.Е., Кобринский А.А. Вибрационные системы. Динамика и устойчивость. М.: Наука, 1973. 591 с.
51. Кобринский А.Е., Кобринский А.А. Двумерные виброударные системы. М.: Наука, 1981. 335 с.
52. Когаев В.П. Расчёты на прочность при напряжениях переменных во времени. М.: Машиностроение, 1977. 232 с.
53. Когаев В.П., Махутов Н.А., Гусенков А.П. Расчёты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность: справочник. М.: Машиностроение, 1985. 224 с.
54. Колмогоров Л.М. Напряжения. Деформации. Разрушение. М.: Металлургия, 1970. 229 с.
55. Копылов Ю.Р. Вибрационное упрочнение. Воронеж: ВИВД, 1999. 386 с.
56. Копылов Ю.Р. Влияние динамического разрыхления рабочей среды на процессы виброударного упрочнения // Известия вузов. М.: Машиностроение, 1986. № 1. С. 148.
57. Копылов Ю.Р., Копылов А.Ю. Критерии оценки технологической стабильности процессов виброударного упрочнения // Перспективные направления развития технологии машиностроения и металлообработки: мат-лы междунар. науч.-техн. конф. Ростов н/Д, 2008. 229 с.
58. Копылов Ю.Р., Солнцев Д.В. Формирование остаточных напряжений при виброударном упрочнении // Вопросы вибрационной технологии: межвуз. сб. ДГТУ. Ростов н/Д, 2003. С. 196–201.

59. Корольков Ю.В. Обеспечение надежности технологических процессов центробежно-ротационной обработки свободным абразивом // Вестник ДГТУ. 2011. № 8. С. 1247–1254.
60. Корольков Ю.В. Повышение надежности технологического процесса центробежно-ротационной обработки в среде абразива: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Ростов н/Д, 2011. 186 с.
61. Костецкий Б.И., Натансон М.Э., Бершадский Л.И. Механохимические процессы при граничном трении. М.: Наука, 1972. 292 с.
62. Костецкий Б.И., Носовский И.Г. Надёжность и долговечность машин. Киев: Техніка, 1975. 408 с.
63. Кочубей А.А. Технологическое обеспечение упрочняющей обработки деталей во вращающемся электромагнитном поле: дис. ... канд. техн. наук. Ростов н/Д, 2017. 156 с.
64. Кравченко Б.А. Повышение выносливости и надёжности деталей машин и механизмов. Куйбышев, 1966. 222 с.
65. Кроха В.А. Упрочнение металлов при холодной пластической деформации: справочник. М.: Машиностроение, 1980. 157 с.
66. Кудрявцев И.В. Повышение долговечности деталей машин методом поверхностного наклёпа. М.: Машгиз, 1965. 264 с.
67. Кудрявцев П.И. Нераспространяющиеся усталостные трещины. М.: Машиностроение, 1982. 174 с.
68. Кузнецов Ю.И., Маслов А.Р., Байков А.Н. Оснастка для станков с ЧПУ // М.: Машиностроение, 1990. 512 с.
69. Кулаков Ю.М., Хрульков В.А. Отделочно-зачистная обработка деталей. М.: Машиностроение, 1979. 216 с.
70. Лебедев В.А. Кинетика формирования упрочнённого поверхностного слоя в процессе ППВ // Вопросы вибрационной технологии: межвуз. сб. науч. ст. Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2006. С. 92–95.
71. Лебедев В.А. Методический подход к выбору технологических режимов упрочняющей обработки ППВ с позиций энергетической интерпретации

процесса // Вопросы вибрационной технологии: межвуз. сб. науч. ст. Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2010. С. 25–32.

72. Лебедев В.А., Стрельцова И.П. Моделирование операций упрочнения деталей динамическими методами поверхностного пластического деформирования // Вопросы вибрационной технологии: межвуз. сб. науч. ст. Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2005. С. 16–20.

73. Лебедев В.А., Веретельников А.К. Обеспечение эффективности упрочнения деталей на основе рационального выбора // Перспективы направления развития технологии машиностроения и металлообработки: мат. междунар. науч.-техн. конф. Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2008. Т. 2. С. 55.

74. Лебедев В.А. Оценка физико-механических характеристик качества поверхности деталей, упрочнённых методами ППВ, с позиций энергетического подхода // Вопросы вибрационной технологии: межвуз. сб. науч. работ. Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2007. С. 148.

75. Лебедев В.А. Технология динамических методов поверхностного пластического деформирования. Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2006. 183 с.

76. Леонтович М.А, Введение в термодинамику. Статическая физика. М., 1983. С.60-64.

77. Макаров В.Ф., Горбунов А. С. Применение различных методов локального ППВ для снижения влияния технологического концентратора напряжений на профильных поверхностях деталей транспортных машин // Научно-технические технологии в машиностроении. 2019. № 7(97). С 42–45 с.

78. Маталин А.А. Технология машиностроения: учебник. Ленинград, 1985. 496 с.

79. Методы проектирования и оптимизации технологического процесса упрочнения деталей нефтегазового назначения / М.В. Песин, Е.Д. Мокроносков // Экспозиция Нефть Газ. 2011. № 6/Н(18). С 18–19.

80. Минаков В.Н., Соколов Н.С., Гарлачов Н.С. Пневмовибродинамическая обработка – предпочтительный метод изготовления

поверхностей пар трения и сопрягаемых поверхностей в неподвижных соединениях // Вестник машиностроения. 2002. № 8. С.12–18.

81. Мищенко Р.А., Лебедев В.А. Оценка влияния поверхностного пластического деформирования на повышение усталостной прочности деталей // Высокие технологии в машиностроении. Самара, 2002.

82. Мищенко Р.А. Оценка влияния виброобработки на интенсивность изнашивания пар трения // Вопросы вибрационной технологии: межвуз. сб. науч. статей. Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2003. С. 201–204.

83. Мищенко Р.А., Подольский М.А. Модель выбора ППВ при оптимизации операции упрочнения // Вопросы вибрационной технологии: межвуз. сб. ст. Ростов н/Д: ДГТУ, 2004. С. 115–120.

84. Морозов В.И., Шубина Н.Б. Наклёп дробью тяжёлонагружённых зубчатых колёс. М.: Машиностроение, 1972. 104 с.

85. Одинцов Л.Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием: справочник. М.: Машиностроение, 1987. 328 с.

86. Олейник Н.В., Кычин В.П., Луговской А.Л. Поверхностное динамическое упрочнение деталей машин. К.: Техніка, 1984. 151с.

87. Отений Я.Н., Виноградов В.В. Основы технологии машиностроения. Волгоград: РПК «Политехник», 2008. 30 с.

88. Отений Я. Н., Оробинский В.М., Мартыненко О.В. Взаимосвязь технологических факторов, геометрических параметров инструмента и качества деталей при обработке поверхностным пластическим деформированием роликами // Прогрессивные технологии в машиностроении: межвуз. сб. науч. тр. Волгоград, 2000. С. 67–72 с.

89. Павлов В.А. Физические основы пластической деформации металлов. М.: Издательство академии наук СССР, 1962. 198 с.

90. Павлов П.А. Механические состояния и прочность материалов: учебное пособие. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1979. 176 с.

91. Панавко Я.Г. Введение в теорию механического удара. М.: Наука, 1977. 223 с.

92. Папшев Д.Д. Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 1978. 152 с.
93. Папшев Д.Д. Упрочнение деталей обкаткой шариками. М.: Машиностроение, 1968. 132 с.
94. Паршев С.Н. Технологическое обеспечение качества поверхностного слоя стальных изделий электромеханической обработкой: дис. ... канд. техн. наук. Волгоград, 1995. 106 с.
95. Пахомова С.А. Разработка технологии поверхностного деформационного упрочнения теплостойких сталей для высоконагруженных зубчатых колес с целью повышения их эксплуатационных свойств: дис. ... канд. техн. наук. М., 1994.
96. Песин М.В., Макаров В.Ф. Развитие цифровых технологий в исследовании остаточных напряжений // Экспозиция Нефть Газ. 2019. № 1(68). С. 53–55.
97. Петерсон Р. Коэффициенты концентрации напряжений. М.: Мир, 1977. 302 с.
98. Петросов В.В. Гидродробеструйное упрочнение деталей и инструмента. М.: Машиностроение, 1977. 166 с.
99. Подольский М.А. Анализ экспериментальных данных с позиций термодинамической модели упрочнения ППВ // Вопросы вибрационной технологии: межвуз. сб. ст. Ростов н/Д: ДГТУ, 2004. С. 78–82.
100. Подольский М.А. Методика оптимизации режимов упрочнения ППВ на основе термодинамического критерия эффективности // Высокие технологии в машиностроении: мат. междунар. науч.- техн. конф. Самара: СамГТУ, 2002. С. 97–100.
101. Подураев В.Н. Технология физико-химических методов обработки. М.: Машиностроение, 1985. 264 с.
102. Полевой С.Н., Евдокимов В.Д. Упрочнение машиностроительных материалов: справочник. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1994. 496 с.

103. Политов И.В., Кузнецов Н.А. Вибрационная обработка деталей машин и приборов. Л.: Машиностроение, 1965. 166 с.
104. Политов И.В. Вибрационная очистка, шлифование, полирование деталей. Л.: ЦНИИТмаш, 1962.
105. Поляк М.С. Технология упрочнения. Технологические методы упрочнения. Т.2. М.: «Л.В.М.-СКРИПТ», «Машиностроение», 1995. 688 с.
106. Попов М.Е. Основы САПР технологических процессов упрочняющей обработки. РИСХМ. Ростов н/Д, 1987. 90 с.
107. Прокопец Г.А. Интенсификация процесса виброударной обработки на основе повышения эффективности вибрационного воздействия и учета ударно-волновых процессов: дис. ... канд. техн. наук. Ростов н/Д, 1995. 196 с.
108. Пшебыльский В. Технология поверхностной обработки / пер. с польского Г.Н. Мехед. М.: Metallurgia, 1991. 479 с.
109. Рагульскене В.Л. Виброударные системы. Вильнюс: Минтис, 1974.
110. Рыжов Э.В., Горленко О.А. Технологическое управление качеством и эксплуатационными свойствами поверхностей. Тула. Тульский политехнический институт, 1980. 65 с.
111. Рыжов Э.В., Суслов А.Г., Федоров В.П. Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин. М., 1979.
112. Рыковский Б.П., Смирнов В.А., Щетинин Г.М. Местное упрочнение деталей поверхностным наклёпом. М.: Машиностроение, 1985. 152 с.
113. Саверин М.М. Дробеструйный наклёп. М.: Машгиз. 1955. 312 с.
114. Санамян В.Г., Кулешов П.В. Исследование влияния избыточного давления в рабочей камере на интенсивность процесса вибрационной обработки // Прогрессивная отделочно-упрочняющая технология: межвуз. сб. науч. тр. / РИСМХ. Ростов н/Д, 1980. С. 180–183.
115. Сидякин Ю.И. Повышение эффективности упрочняющей механической обработки валов обкаткой их роликами или шариками // Упрочняющие технологии и покрытия. 2001. № 2. С. 43–49.

116. Смелянский В.М. Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 2002. 299 с.
117. Смоленцев В.П. Инновационные технологии комбинированных методов обработки // Научно-технические технологии в машиностроении. 2017. № 7. С. 15–19.
118. Соловьев С.Н. Новые технологические методы упрочнения деталей судовых машин и механизмов: учебное пособие. Николаев: НКИ, 1975. 36 с.
119. Солоненко В.Г., Двадненко В.И., Двадненко И.В. Повышение качества режущих инструментов поверхностным пластическим деформированием // Упрочняющие технологии и покрытия. 2005. № 3. С.11–17.
120. Субач А.П. Динамика процессов в технологии виброударной обработки деталей // Вопросы вибрационной технологии: межвуз. сб. науч. ст. Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2009. С. 21–33.
121. Субач А.П. Динамика процессов и машин объёмной вибрационной и цен-тробежной обработки деталей. Рига: Знание, 1991. 400 с.
122. Суслов А.Г., Браун Э.Д., Виткевич Н.А. Качество машин. Справочник в 2-х т. М.: Машиностроение, 1995. 256 с.
123. Суслов А.Г. Технологическое обеспечение и повышение эксплуатационных свойств деталей машин обработкой пластическим деформированием // Справочник. Инженерный журнал. 2003. № 8. С.8–12.
124. Тамаркин М.А., Тищенко Э.Э., Лебеденко В.Г. Повышение качества поверхностного слоя деталей при отделочно-упрочняющей обработке в гранулированных рабочих средах // СТИН. 2007. № 1. С. 33–36.
125. Тамаркин М.А., Тищенко Э.Э., Корольков Ю.В. Повышение эффективности центробежно-ротационной обработки в среде абразива // СТИН. 2009. № 2. С. 26–30.
126. Тамаркин М.А., Бабичев А.П., Вяликов И.Л. Разработка и исследование технологической схемы виброультразвуковой обработки // Упрочняющие технологии и покрытия. 2012. № 8. С. 29–32.

127. Тамаркин М.А., Тищенко Э.Э. Технологические основы обработки деталей ППВ в гранулированных рабочих средах // Научно-технические основы машиностроения и авиастроения: мат. IV междунар. науч.-техн. конф. Рыбинск: 2012. С. 153–160.

128. Тарасова Е.А. Разработка и исследование способов комбинированной упрочняющей обработки для повышения эксплуатационных свойств винтовых передач: дис. ... канд. техн. наук. Н.Новгород, 2000.

129. Терентьев В.Ф. Усталостная прочность металлов и сплавов. М.: Интернет-инжиниринг. 2002. 287 с.

130. Тимошенко С.П., Гере Д.Ж. Механика материалов. М.: Мир, 1976. 670 с.

131. Тищенко Э.Э., Тамаркин М.А., Лебедеко В.Г. Повышение качества поверхностного слоя деталей при обработке поверхностным пластическим деформированием в гибких гранулированных средах // Вестник Донского государственного технического университета. 2009. № 3(42). С. 469–480.

132. Тищенко Э.Э. Повышение эффективности отделочно-упрочняющей центробежно-ротационной обработки: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Ростов н/Д, 2004. 152 с.

133. Федоров В.В. Кинетика повреждаемости и разрушения твердых тел. Ташкент: Издательство «ФАН», 1985. 166 с.

134. Федоров В.В. Термодинамические аспекты прочности и разрушения твердых тел. Ташкент: Издательство «ФАН», 1979. 68 с.

135. Френкель Я.И. Введение в теорию металлов. М., 1958. 368 с.

136. Цесняк Л.С. Механика и микрофизика истирание поверхностей. М.: Машиностроение, 1979. 264 с.

137. Чепан П.А. Технологические основы упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием. Минск: Наука и техника, 1981. 128 с.

138. Чепан П.А., Андрияшин В.А. Эксплуатационные свойства упрочненных деталей. Минск: Наука и техника, 1988. 192 с.

139. Шашин М.Я. Повышение циклической прочности при обработке деталей дробью // *Металловедение и термическая обработка*. 1959. № 1. С.41–47.
140. Шведова А.С., Казаков Д.В. Обеспечение надежности технологического процесса центробежно-ротационной отделочно-упрочняющей обработки // *Инженерный вестник Дона*. 2014. № 4.
141. Шевцов М.Ю., Голенко А.О. Повышение качества поверхностного слоя методом комбинированной электромеханической обработки // *Современные материалы, техника и технологии*. 2018. № 5(20). С.14–27.
142. Школьник Л.М. Методика усталостных испытаний. М.: *Металлургия*, 1978. 302 с.
143. Шрадер Р. Механохимия твёрдых тел // *Наука и человечество: междунар. ежегодник*. М.: *Знание*, 1969. 418 с.
144. Ящерицын П.И., Минаков А.П. Упрочняющая обработка нежестких деталей в машиностроении. Мн.: *Наука и техника*, 1980. 215 с.
145. Ящерицын П.И., Рыжов Э.В., Аверченко В.И. Технологическая наследственность в машиностроении. Минск: *Наука и техника*, 1977. 256 с.
146. Babichev I.A., Prokopetch G.A. Formation of regular microrelief on surface while processing by multicontact vibrohitting tool // *2th International Technological-Scientific Conference. Polska/ Gorz:Wlkp / Lubniewice*, 1993. P. 275–278.
147. Brach R.M. *Mechanical impact dynamic: Rigid body collisions*. New York: *John Wiley & Sons*, 1991. 126 p.
148. Chatterjee A., Ruina A. Two interpretations of rigidity in rigid-body collisions. *Trans. ASME. J. Appl. Mech.* V.65. Dec. 1998. Pp. 894–900.
149. Elliott T.L. Surface hardening. *Tribol Int.* 1978. V. 1. № 2. P.121–125.
150. Fauve S., Douady S., Laroche C. Collective behaviors of granular masses under vertical vibration. France, 1989. Vol. 50. № 3. Pp. 187–191.
151. Goyal S., Pinson E.N., Sinden F.W. Simulation of dynamics of interacting rigid bodies including friction 1: General problem and contact model. *Engineering with computer*. 1994. V. 10. Pp. 162–174.
152. Przybylski V. *Tekhnologiya poverkhnostnoy plasticheskoy obrabotki / per.*

s Polsk. [The process of surface plastic working: Translated from Polish]. M.: Metallurgia,1991. 479 p.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А. АКТ ВНЕДРЕНИЯ

Утверждаю

Проректор по НИР и ИД

ДГТУ



Сухинов А.И.

Утверждаю

Директор ООО РТЦ «Технология»

А.В. Русанов/

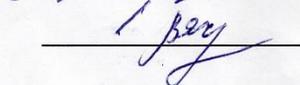


### Акт внедрения

Комиссия в составе представителей Донского государственного технического университета, профессора кафедры «Технология машиностроения» Лебедева В. А., аспиранта кафедры «Технология машиностроения» Соколова В.Д и представителя ООО РТЦ «Технология» заместителя директора по качеству Зацепилина Алексея Никифоровича составила настоящий акт в том, что результаты научно- исследовательской работы, проведённые в НИИ «Вибротехнология» ДГТУ на тему «Разработка эффективных технологий упрочнения ППД на основе энергетической оценки качества поверхностного слоя», были использованы для разработки регламента виброударной упрочняющей обработки при внедрении технологии изготовления деталей: «Вал промежуточный L 859 z 22/22 KM 101.016» и «Колесо зубчатое 1.327.673».

Научно обоснованные аналитические зависимости по оценке качества поверхностного слоя и эксплуатационных свойств деталей, разработанных на основе термодинамических представлений процесса ППД, рекомендованы для включения в инструкции по конструкторско- технологической подготовке производства изделий.

ДГТУ

В.А.Лебедев

В.Д. Соколов

ООО РТЦ «Технология»

 / А.Н. Зацепилин/