

На правах рукописи



СОКОЛОВ Вячеслав Дмитриевич

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

Специальность: 2.5.6. Технология машиностроения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Воронеж – 2023

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Донской государственный технический университет»

Научный руководитель

Лебедев Валерий Александрович,
кандидат технических наук, профессор

Официальные оппоненты

Сидякин Юрий Иванович,
доктор технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный
технический университет», кафедра
«Технология машиностроения», профессор

Рязанцев Александр Юрьевич,
кандидат технических наук,
АО «Конструкторское бюро химавтоматики»,
конструкторский отдел проектирования средств
технологического оснащения, начальник отдела

Ведущая организация

ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный
технический университет имени Т.Ф.
Горбачева» (г. Кемерово)

Защита диссертации состоится «21» июня 2023 г. в 12-00 на заседании диссертационного совета 24.2.286.06, созданного на базе ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», по адресу: г. Воронеж, Московский просп., 14, ауд. 216.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» и на сайте <https://cchgeu.ru>.

Автореферат разослан «24» апреля 2023 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
к.т.н., доцент

Андрей Владимирович
Мандрыкин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. В современных условиях перед машиностроением ставится большой спектр задач, от успешного решения которых зависит качество выпускаемой продукции и повышение эффективности производства. В решении 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 детали и приемлемую 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 подвергаемого 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 его практического применения не решен целый комплекс вопросов, связанных с разработкой на его основе методик выбора режимов упрочнения ДППВ, определением характеристик качества поверхностного слоя, прогнозированием

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. Чепа, А.В. Киричек, Ю.Р. Копылов, Д.Л. Соловьев, А.П. Бабичев, В.В. Швец, В.А. Тамаркин, 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 определению 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 металловедения.

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 международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы техники и технологии» (Орёл, 2012); всероссийской с международным участием научно-технической конференции «Жизненный цикл конструкционных материалов» (Иркутск, 2012, 2014, 2016); международной научно-технической конференции «Наукоёмкие технологии в машиностроении и авиадвигателестроении» (Рыбинск, 2012); международной

научно-технической конференции «Перспективные направления развития технологии машиностроения и металлообработки» (Ростов-на-Дону, 2013); международной научно-технической конференции «Наукоемкие комбинированные и виброволновые технологии обработки материалов» (Ростов-на-Дону, 2013); международной научно-технической конференции «Машиностроение – основа технологического развития России (ТМ2013)» (Курск, 2013); международном научном симпозиуме технологов-машиностроителей и механиков «Волновые и виброволновые технологии в машиностроении, металлообработке и других отраслях» (Ростов-на-Дону, 2014); международном научном симпозиуме технологов-машиностроителей «Интегрированные, виброволновые технологии в машиностроении, металлообработке и других отраслях» (Ростов-на-Дону, 2015); международной научно-технической конференции «Перспективные направления развития отделочно-упрочняющей обработки и виброволновых технологий» (Ростов-на-Дону, 2017, 2019-2020); международной научно-технической конференции «Виброволновые процессы в технологии обработки высокотехнологичных деталей» (Ростов-на-Дону, 2017); международной научно-технической конференции «Фундаментальные основы физики, химии и механики наукоёмких технологических систем формообразования и сборки изделий» (Ростов-на-Дону, 2019-2021).

Публикации результатов работы.

По результатам диссертационного исследования опубликованы 22 научные 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, пяти глав, заключения и библиографического списка, включающего 152 источника. Работа изложена на 131 странице, содержит 50 рисунков, 22 таблицы, 1 приложение.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, связанной с разработкой на основе энергетического подхода методики выбора режимов ППВ динамическими методами, методов определения характеристик качества поверхностного слоя, прогнозирования ресурса изделий на этапе их эксплуатации; сформулированы цель и задачи работы, изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе раскрыты технологические возможности и закономерности упрочнения поверхности динамическими методами ППВ, основные подходы к оценке эффективности и энергетические аспекты упрочняющей обработки ДППВ.

Показано, что несмотря на многообразие методов, разработанных для реализации этого способа упрочнения, явления, происходящие в поверхностном слое имеют одинаковый характер; эффективность влияния ДППВ на физико-механические и эксплуатационные свойства поверхности

деталей определяется энергетическими возможностями технологических систем, реализующих конкретный метод. По своей физической сущности ДППВ представляет процесс микро- и субструктурных изменений, в результате которых формируется упрочнённый поверхностный слой, обеспечивающий повышение эксплуатационных свойств деталей.

Проведённый анализ научно-технической литературы показал, что для обоснования режимов упрочнения ДППВ в основном 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. Многофакторность процесса ДППВ, связанная с одновременным протеканием эффектов пластической деформации, микро- и субструктурных изменений, отсутствие научно обоснованного обобщённого критерия оценки эффекта упрочнения является сдерживающим фактором выбора метода ДППВ и, как следствие, проектирования рациональной технологии его реализации для повышения эксплуатационных свойств деталей.

Для разрешения этого вопроса в работах В.В. Фёдорова, В.С. Ивановой, П.А. Павлова выдвинуты предпосылки об использовании термодинамических характеристик вещества для обоснования величины предельной энергии, затрачиваемой на деформирование твердого тела. Исходя из этих предпосылок и основываясь на аналогии между процессами поглощения энергии кристаллической решеткой при механическом нагружении и при нагреве в работе В.А. Лебедева, М.А. Подольского предлагается энергию, накапливаемую в поверхностном слое при ДППВ, оценить величиной ΔH , равной изменению теплосодержания металла при нагреве от заданной температуры T_i до температуры плавления T_s

$$\Delta H = \int_{T_{293}^0}^{T_{TS}} C_p dT, \text{ Дж/моль}, \quad (1)$$

где C_p - удельная теплоемкость, Дж/К·моль; T_{TS} - температура плавления, К; T_{293}^0 - энтальпия при 293 °К; T , К.

Однако предложенный энергетический критерий ДППВ не получил экспериментального подтверждения. На основе априорной информации сформулированы цель и задачи исследования.

Во второй главе проведено обоснование эффективности упрочнения динамическими методами ППВ с позиций энергетического подхода. 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 материала – 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.

Условие, определяющее энергетическое состояние пластически деформированного локального микрообъема поверхности, имеет вид:

$$E = E_0 + E_y; \quad E \leq \Delta H = const; \quad (2)$$

где E_0 – энергетическое состояние локального микрообъема в исходном (до ППВ) состоянии, учитывая наследственные свойства материала; E_y – изменение внутренней энергии локального микрообъема поверхности в процессе ДППВ за определенный промежуток времени обработки t , как следует из рисунка 1, равно:

$$E_y(t_i) = E_T + E_{пл}, \text{ Дж/моль}, \quad (3)$$

Используя для оценки влияния теплового эффекта на изменение энергетического состояния локального объема E_T уравнение Р. Клаузиуса, устанавливающего количество теплоты, переданной телу при температуре T , и выразив $E_{пл}$ в функции от силовых факторов контактного взаимодействия инденторов с обрабатываемой поверхностью, получено выражение энергетического баланса модифицированного в процессе ДППВ локального объема в виде:

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

где R – постоянная Больцмана, $R = 8,314 \text{ Дж/К} \cdot \text{моль}$; T – абсолютная температура К; t – время пребывания системы в нагруженном состоянии, с; τ_0 – период тепловых колебаний атомов; m_Σ – приведённая масса инденторов, взаимодействующих с поверхностью $m_\Sigma = 3 \div 4m$, m – масса единичного

индентора, кг; V - скорость соударения инденторов с обрабатываемой поверхностью, м/с; HV - твердость обрабатываемого материала, Па; V_m - молярный объём, м³/моль; k_d - коэффициент диссипации; k_σ - коэффициент перенапряжений на межатомных связях; k_n - коэффициент учитывающий долю механической энергии в общем балансе работы деформации, накапливаемой в локальном объеме поверхностного слоя; σ - эффективное значение напряжения в локальной зоне силового нагружения поверхности, Па.

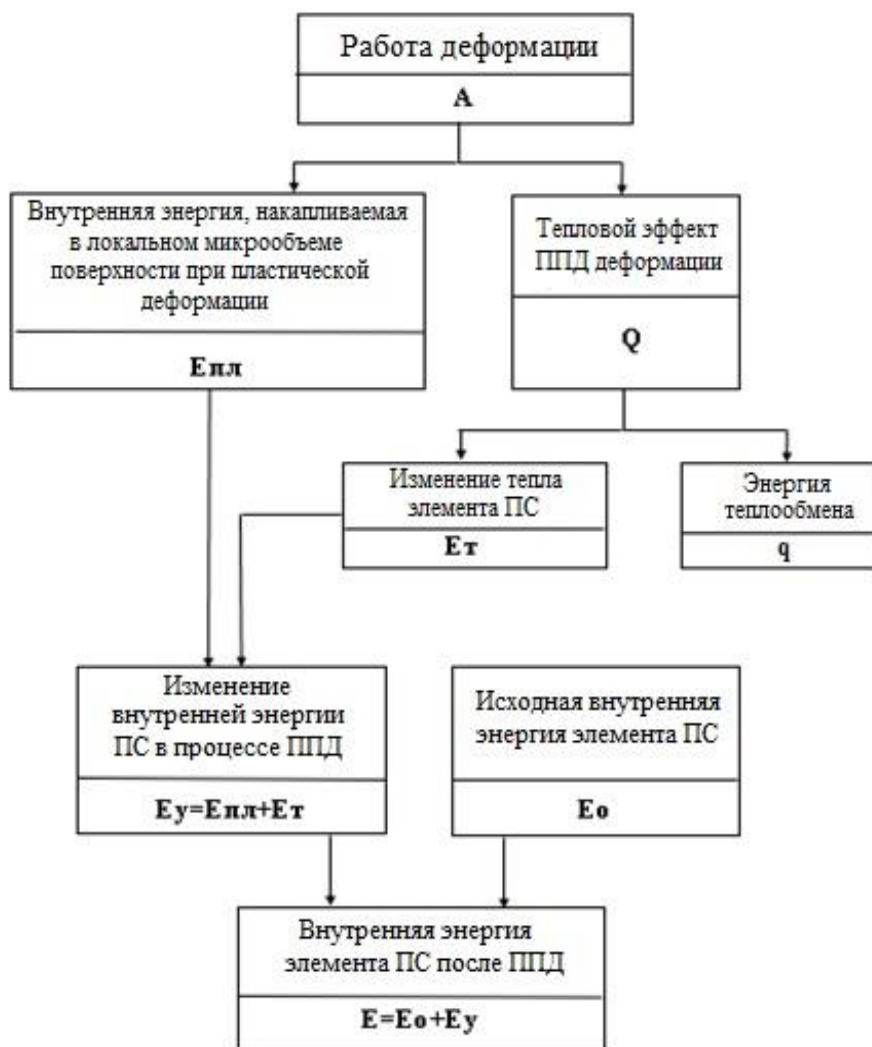


Рисунок 1 – Механизм изменения энергетического состояния локального объём поверхности при ДППВ

Из энергетической модели ДППВ следует, что основной вклад в макро- и субструктурные изменения поверхностного слоя и, как следствие, его упрочнение, вносят тепловой и механический факторы. Для подтверждения энергетического критерия эффективности упрочнения поверхностного слоя ΔH динамическими методами ППВ проведено экспериментальное исследование в основу которых был положен калориметрический метод, позволяющий измеряя величину приращения температуры деформируемого металла определить истинное количество тепла, выделившегося в результате теплового эффекта.

Для проведения исследований на основе маятникового копра, позволяющего имитировать процесс ДППВ, была изготовлена калориметрическая установка (рисунок 2).

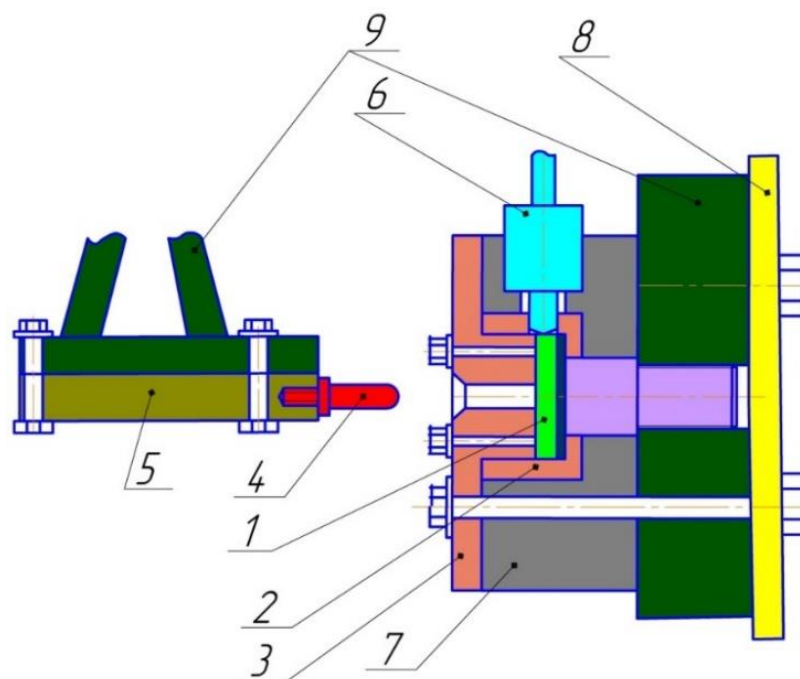


Рисунок 2 – Калориметрическая установка: 1 – экспериментальный образец, 2 – цилиндрическая калориметрическая камера, 3 – крышка, 4 – индентор, 5 – ударник, 6 – датчик измерения температуры, 7 – корпус камеры, 8 – установочная плита, 9 – элементы копра

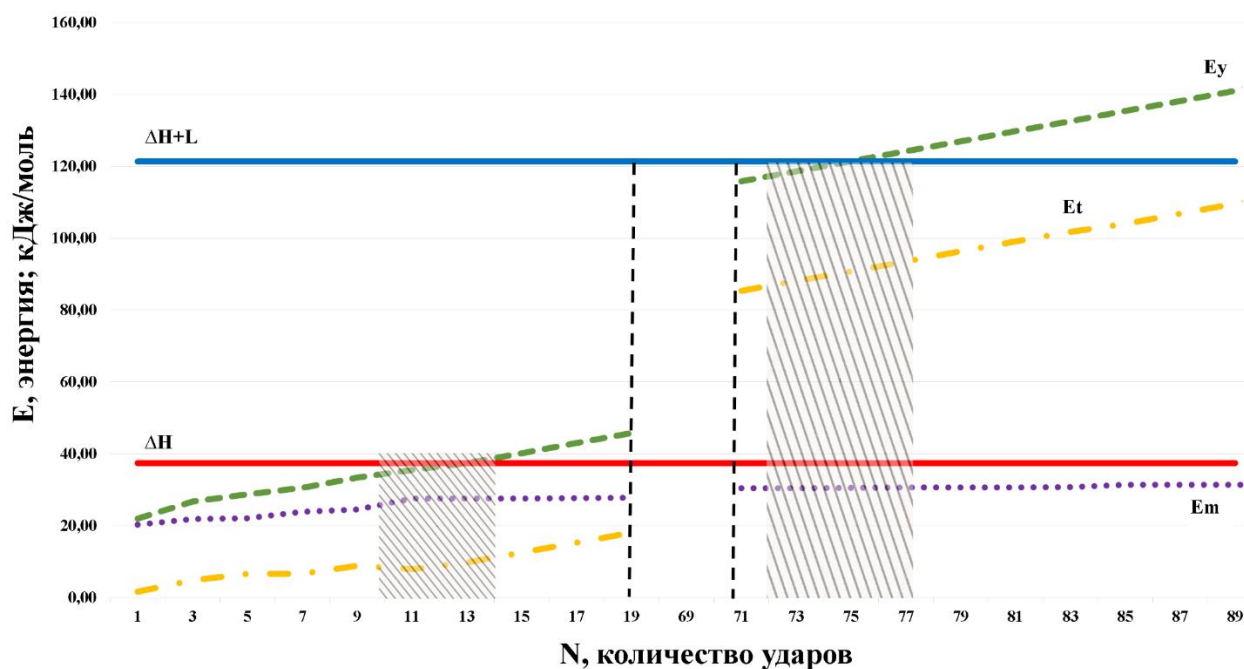


Рисунок 3 – Изменения величины внутренней энергии, накапливаемой в локальном пластически деформированном объёме поверхности от количества актов ударно-силового воздействия на него и её составляющих (механической и тепловой)

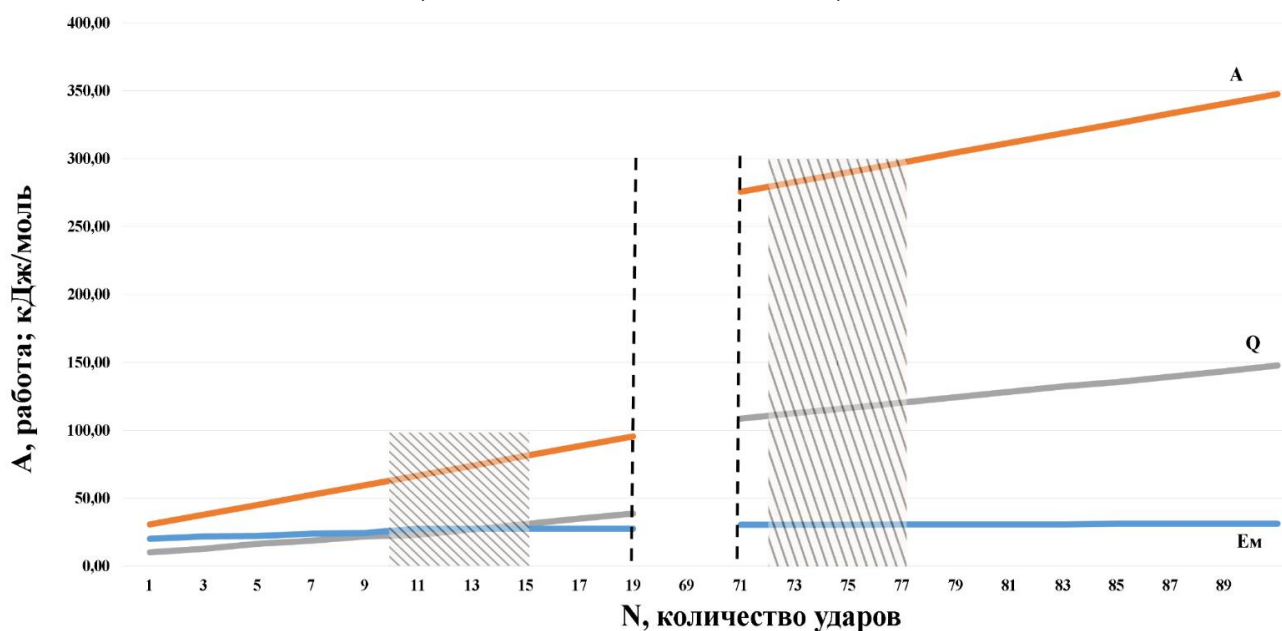


Рисунок 4 – Изменение работы внутренней энергии и теплосодержания от количества актов ударно-силового воздействия

В результате экспериментальных исследований, проиллюстрированных на рисунках 3 и 4, установлено:

1. Предельный рост энергии, накапливаемой в локальном объёме поверхности, происходит при осуществлении 10–14 актов контактного взаимодействия индентора с поверхностью. Дальнейший рост внутренней энергии происходит в результате протекания энтропийных процессов в локальном объёме, обусловленным тепловым эффектом.

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 критерий упрочнения поверхности динамическими методами ППВ.

3. Доля энергии, определяющая 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 разрушения поверхности, составила 124,23 кДж/моль, которая превышает критерий ΔH на величину, равную 84 кДж/моль, соизмеримую с теплотой плавления для исследуемых материалов.

В третьей главе на основе энергетического критерия установлены расчетные зависимости для определения физико-механических характеристик качества поверхностного слоя, формируемого в процессе ДППВ.

В результате многочисленных экспериментальных исследований обобщенная зависимость между твердостью и интенсивностью напряжения имеет вид:

$$\sigma_i = 0,067HV_{\text{пс}}, \text{ Па}, \quad (5)$$

где HV – твердость материала по Виккерсу, Па.

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

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

где G – модуль сдвига, Па; E – внутренняя энергия локального микрообъёма поверхностного слоя, Дж/моль; V_m – молярный объём, м³/моль.

Из выражений (5) и (6) вытекает корреляционная связь энергетического состояния локального микрообъёма и, как следствие, поверхностного слоя, с его твёрдостью:

$$E = K_{\text{пр}} \cdot HV_{\text{пс}}^2, \text{ Дж/моль}, \quad (7)$$

где $K_{\text{пр}} = \frac{0,067^2}{6G} V_m$ – энергетический коэффициент, характеризующий прочностные свойства упрочняемого материала, м³/моль·Па; $HV_{\text{пс}}$ – твердость поверхностного слоя, формируемого в процессе ДППВ, МПа.

На основе выше представленных корреляционных связей разработаны расчетные зависимости для определения физико-механических характеристик качества упрочнённого поверхностного слоя:

- предельно допустимой величины твердости поверхностного слоя

$$HV_{ис}^* = \sqrt{\Delta H / K_{пр}}, \text{ Па}, \quad (8)$$

- максимально достигаемой в процессе ППВ глубины упрочнённого слоя

$$h_H^* = 0,45 \sqrt[3]{\vartheta \left(\frac{[\Delta H / K_{пр}]^{0,5} - HV_{исх}}{HV_{исх}} \right)}, \text{ м}, \quad (9)$$

- величины остаточных сжимающих напряжений в поверхностном слое

$$\sigma_o^* \approx -0,067 \sqrt{\Delta H / K_{пр}}, \text{ Па}, \quad (10)$$

В результате преобразований из энергетической модели (4) получена формула для расчета продолжительности обработки методами ДППВ, при которой достигается наибольший эффект упрочнения поверхности детали:

$$t = \tau_0 \cdot \exp \left(\frac{\Delta H - E_o - k_\sigma k_H V_m \sigma \sqrt[4]{\frac{3m_\Sigma \cdot k_d \cdot V^2}{HV \cdot D^3}}}{TR} \right), \text{ с}, \quad (11)$$

Для подтверждения адекватности предложенных расчетных зависимостей использовались результаты экспериментальных исследований, приведенные в научно-технической литературе, посвященной динамическим методам ППВ (рисунки 5, 6).

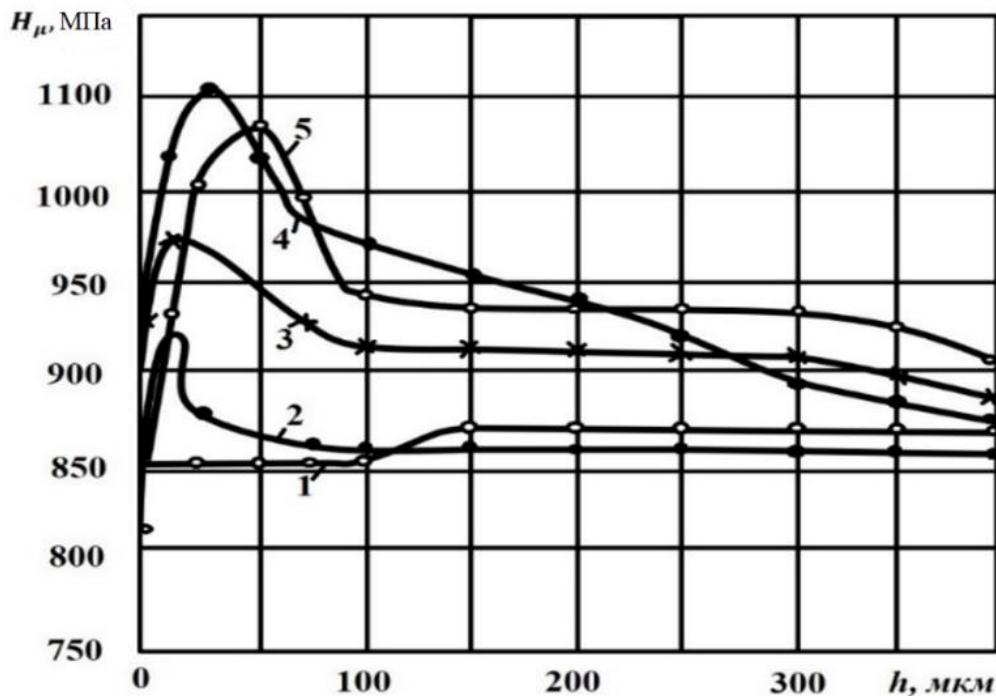


Рисунок 5 – Влияние виброударной обработки на изменение твердости образцов из стали 16ХЗНВМФБШ ($HV = 8500 \text{ МПа}$);
режимы обработки: $A = 2,5 \text{ мм}$, $f = 30 \text{ Гц}$, $d = 8 \text{ мм}$,
при 1 – исходная; 2 – $t = 10 \text{ мин}$; 3 – $t = 15 \text{ мин}$; 4 – $t = 20 \text{ мин}$; 5 – $t = 30 \text{ мин}$

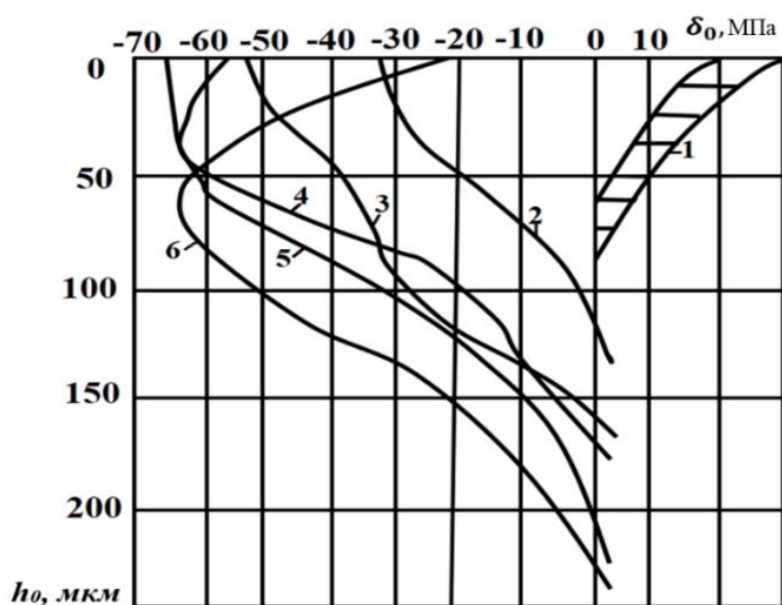


Рисунок 6 – Изменение осевых остаточных напряжений по глубине упрочненного поверхностного слоя после виброударной обработки образцов: сталь 30ХЗВА(HV – 800 МПа) в зависимости от продолжительности обработки: 1 – исходная; 2 – $t = 10$ мин; 3 – $t = 15$ мин; 4 – $t = 20$ мин; 5 – $t = 30$ мин

На основе экспериментальных данных строились графики изменения максимальной твердости (рисунок 7), глубины упрочнения (рисунок 8) и величины максимальных остаточных напряжений (рисунок 9) в зависимости от продолжительности обработки.

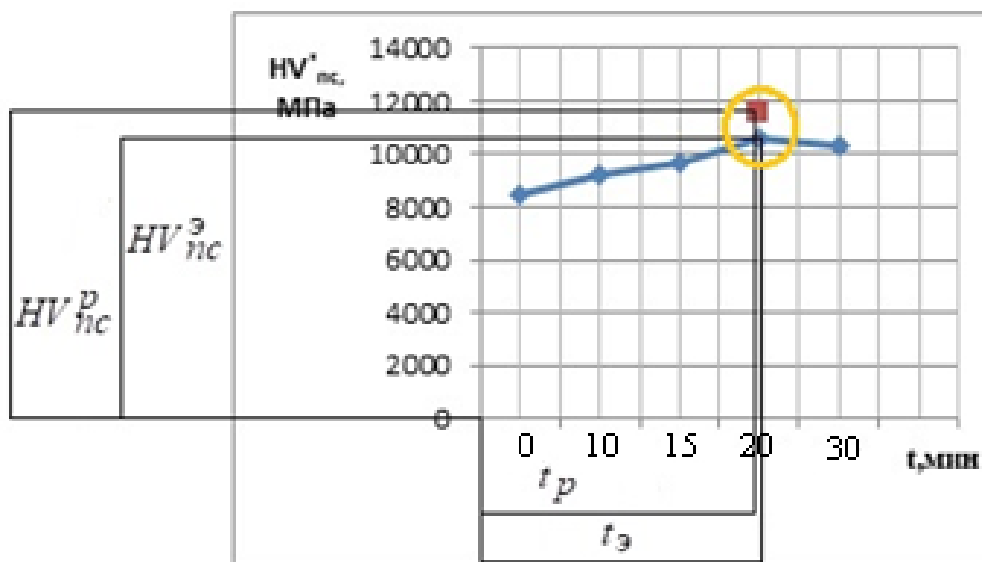


Рисунок 7 – Изменение максимальной твердости в зависимости от продолжительности обработки

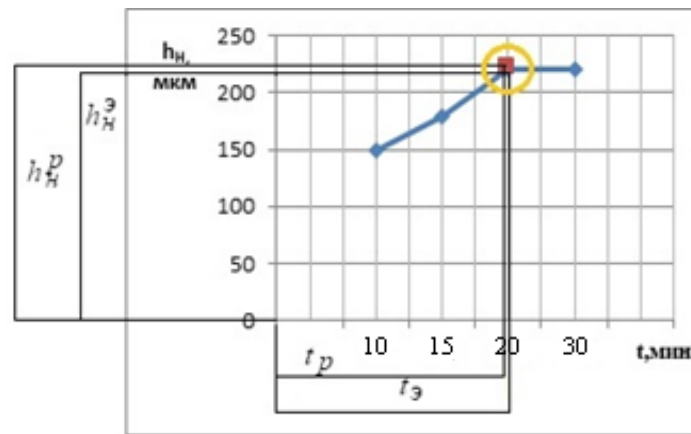


Рисунок 8 – Изменение максимальной глубины упрочнения в зависимости от продолжительности обработки

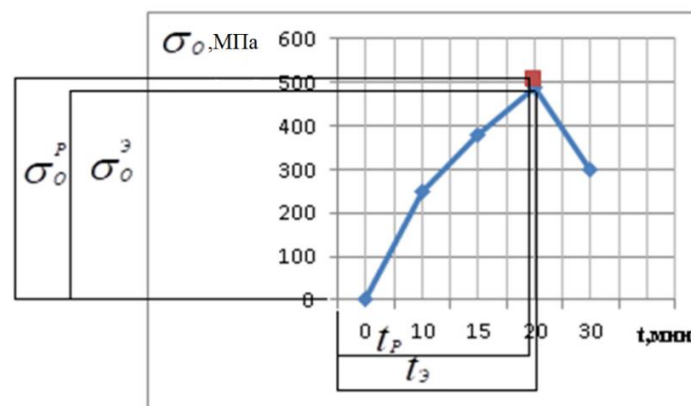


Рисунок 9 – Изменение величины максимальных остаточных напряжений в зависимости от продолжительности обработки

Для условий обработки, обеспечивающих наибольшее значение параметра качества поверхностного слоя, по формулам (8, 9, 10) определялось расчетное значение, которое сравнивалось с экспериментальным (Рис. 7, 8, 9). Результаты сравнительного анализа показали приемлемость установленных расчетных зависимостей для оценки параметров физико-механических характеристик упрочненного поверхностного слоя динамическими методами ППВ. Расхождение расчетных и экспериментальных результатов находится в пределах допустимой экспериментальной ошибки (не превышает 13,5%).

В четвертой главе предложен энергетический метод оценки влияния ДППВ на повышение эксплуатационных свойств деталей. Задача состояла в обосновании энергетического условия разрушения поверхностного слоя в процессе циклического нагружения и разработки метода оценки усталостной долговечности деталей.

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

$$U_n \leq E_0 + E_y, \quad (12)$$

При эксплуатации в поверхностном слое происходят дополнительные микро- и субструктурные 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. С позиций энергетического подхода условие разрушения локального объема твердого тела в процессе эксплуатации имеет вид:

$$U = U_{кр}, \text{ Дж/моль}, \quad (13)$$

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

Развивая аналогию между процессами поглощения энергии кристаллической решёткой при механическом нагружении и при нагреве в качестве критической величины, определяющей энергетическое состояние локального объема и предопределяющей его разрушение, принята термодинамическая величина, равная сумме энергетического критерия ДППВ и температуры плавления. Данная величина разрушения была экспериментально доказана в ранее приведённых экспериментальных исследованиях при обосновании энергетического критерия ДППВ:

$$U_{кр} = \Delta H + L_{пл}, \text{ Дж/моль}, \quad (14)$$

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

С учётом (14) и (12) получим энергетическую модель разрушения локального объема твердого тела в процессе эксплуатации:

$$TR \ln(t_p / \tau_0) + k_\phi k_a V_m \sigma \bar{\epsilon} t_p + U_n = \Delta H + L_{пл}, \text{ Дж/моль}, \quad (15)$$

где T – абсолютная температура условий эксплуатации, К; t_p – продолжительность эксплуатации до разрушения, с; k_ϕ – коэффициент формы кривой «напряжение-деформация»; k_a – коэффициент, учитывающий долю механической энергии в общем балансе работы деформации, накапливаемой в локальном объеме поверхностного слоя; σ – эквивалентное напряжение, определяемое характером силового воздействия на локальный объем (статическое, динамическое, циклическое), МПа; $\bar{\epsilon}$ – средняя скорость неупругой деформации, с⁻¹.

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

Выразив зависимость из энергетической модели разрушения (15) время до разрушения t_p , получим в общем виде уравнение долговечности:

$$t_p = \tau_0 \exp \left(\frac{\Delta H + L_{пл} - U_n - k_\phi k_a V_m \sigma \Delta \epsilon_{кр}}{RT} \right), \text{ с}, \quad (16)$$

Для количественной оценки влияние методов ДППВ на усталостную долговечность деталей предложен коэффициент K_V , представляющий собой

отношение пределов выносливости упрочнённых ППВ $\sigma_{-1}^{\text{упр.}}$ и исходных деталей $\sigma_{-1}^{\text{исх}}$ и определяемый по формуле:

$$K_V = \exp \left(\frac{\sigma_a \left(k_\phi k_a V_m \frac{HV_{\text{ис}}}{HV} - \overline{k_\phi k_a V_m} \right) - \Delta H + E_0}{RT} \right), \quad (17)$$

Подтверждение энергетической модели разрушения (15) проводилось путем сравнения расчетных и экспериментальных данных, представленных в научно-технической литературе, посвященной исследованиям усталостной долговечности деталей и полученных в лабораторных условиях путем испытания образцов на установке для усталостных испытаний У-20, разработанной в ДГТУ.

Таблица 1 – Сравнительный анализ расчетных и экспериментальных данных влияния виброударной обработки на повышение усталостной долговечности образцов

Материал образцов	Режимы виброударного упрочнения	Амплитуда циклического нагружения σ_a	Усталостная долговечность эксперимент $K_{V_э}$	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

На рисунке 10 дан сравнительный анализ результатов экспериментальных и расчётных данных для различных методов ДППВ.

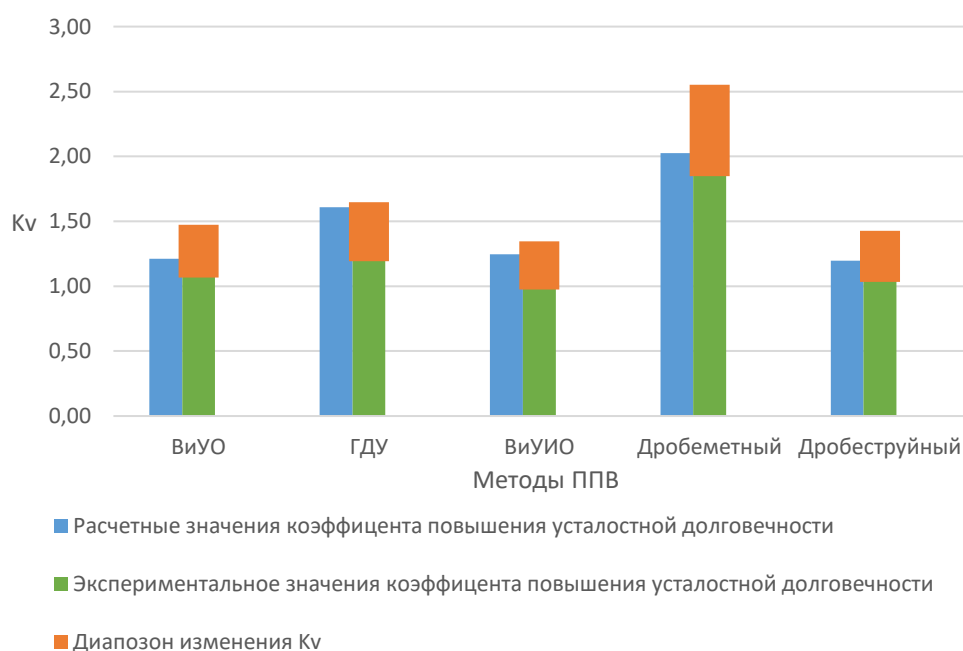


Рисунок 10 – Сравнение расчетных и экспериментальных данных изменения усталостной долговечности при динамических методах ППВ

На основе проведённых исследований установлено, что предложенная расчетная зависимость позволяет с достаточной для практики точностью (в пределах 16 %) оценивать эффективность упрочнения методами ДППВ на повышение усталостной долговечности.

В пятой главе разработана методика расчёта технологических режимов ППВ и параметров качества поверхности; приведен алгоритм проектирования операций упрочняющей обработки методом ППВ; результаты исследования рекомендованы ООО РТЦ «Технология» (г. Азов) для обоснования режимов эффективного виброударного упрочнения деталей.

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 характеристики 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 ДППВ.

7. Дальнейшее развитие результатов диссертационного исследования предусматривает изучение приемлемости применения энергетического подхода

для: оценки влияния ДППВ на износостойкость и коррозионную стойкость поверхности деталей; обоснования прочности покрытий; оценки эффективности отделочно-упрочняющей обработки поверхностей статическими методами ППВ.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

Публикации в научных изданиях в базе данных Scopus

1. Lebedev, V.A. Energy State of a Plastically Deformed Surface Layer / V.A. Lebedev, **V.D. Sokolov**, A.V. Kirichek // Procedia Engineering 150(2016). International Conference on Industrial Engineering, ICIE 2016. – Pp. 775–781.

Публикации в научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ

2. Лебедев, В.А. Энергетическая модель процесса поверхностного пластического деформирования свободнодвижущимися инденторами / В.А. Лебедев, Ю.В. Марченко, **В.Д. Соколов**, Д.С. Апрышкин // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2012. – № 8(92). – С. 15-17.

3. Лебедев, В.А. Энергетическая модель формирования вибрационных механо-химических покрытий / В.А. Лебедев, В.В. Иванов, **В.Д. Соколов**, В.Г. Санамян // Наноинженерия. – 2013. – № 5(23). – С. 11-17.

4. Пинахин, И.А. Исследование изменений структуры 3-го рода стали г2, прошедшей объемное импульсное лазерное упрочнение (оилу), при помощи рентгеноструктурного анализа / И.А. Пинахин, В.А. Черниговский, М.А. Ягмуров, **В.Д. Соколов** // Наноинженерия. – 2015. – № 1(43). – С. 33-36.

5. Лебедев, В.А. Энергетический метод оценки влияния ППВ на повышение эксплуатационных свойств деталей / В.А. Лебедев, **В.Д. Соколов**, С.Ю. Штынь, И.Л. Вяликов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – Орёл: Изд-во ИОГТУ, 2015. – № 3(311). – С. 73-77.

6. **Соколов, В.Д.** Исследования энергетического состояния поверхностного слоя, упрочненного методами ППВ / **В.Д. Соколов**, В.А. Лебедев, С.Ю. Штынь, М.А. Ягмуров // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2015. – № 9(129). – С. 15-20.

7. Лебедев, В.А. Методика разработки технологических процессов получения покрытий в вибрационных технологических системах / В.А. Лебедев, С.Ю. Штынь, **В.Д. Соколов** // Известия ВолгГТУ. – 2017. – № 9(204). – С. 88-91.

8. Лебедев, В.А. Прогнозирование физико-механических характеристик качества поверхностного слоя, модифицированного ППВ / В.А. Лебедев, **В.Д. Соколов**, И.В. Давыдова // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2018. – Т. 14. – № 2(158). – С. 54-58.

9. Лебедев, В.А. Эффективность применения дополнительной упрочняющей обработки методом поверхностного пластического деформирования для повышения усталостной долговечности деталей / В.А.

Лебедев, Ф.А. Пастухов, **В.Д. Соколов**, М.А. Бойко // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2019. – Т. 15 – № 3(171). – С. 122-126.

10. **Соколов, В.Д.** Проектирование технологии упрочнения деталей динамическими методами ППВ / **В.Д. Соколов**, В.А. Лебедев, А.П. Чучукалов, И.В. Давыдова // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2022. – Т. 18. – № 11(215). – С. 507-511.

Публикации в других научных изданиях

11. **Соколов, В.Д.** Способ оценки предельной твёрдости поверхностного слоя деталей упрочнённого динамическими методами ППВ / **В.Д. Соколов**, Д.С. Апрышкин // Жизненный цикл конструкционных материалов (от получения до утилизации): материалы II Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием. – Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2012. – С. 48-51.

12. **Соколов, В.Д.** Моделирование динамических характеристик процесса виброударной обработки / **В.Д. Соколов**, Ю. Марченко // Машиностроение: сб. науч. тр. – Полтава: Изд-во ПолНТУ, 2012. – С. 139-145.

13. Лебедев, В.А. Обоснование предельно-эффективной упрочняемости материала детали в процессе ППВ динамическими методами / В.А. Лебедев, **В.Д. Соколов** // Вопросы вибрационной технологии: межвуз. сб. науч. ст. – Ростов н/Д: ДГТУ, 2012. – С. 18-22.

14. Лебедев, В.А. Оптимизационная модель упрочняющей обработки деталей динамическими методами ППВ / В.А. Лебедев, **В.Д. Соколов** // Научно-технические технологии в машиностроении и авиадвигателестроении: материалы IV Междунар. науч.-техн. конф. – Рыбинск: Изд-во РГАТУ, 2012 – Ч. 2. – С. 237-243.

15. **Соколов, В.Д.** Перспективы развития динамических методов ППВ / **В.Д. Соколов**, С.Ю. Штынь // Перспективные направления технологии машиностроения и металлообработки: сб. тр. междунар. науч.-техн. конф. – Ростов н/Д: ДГТУ, 2013. – С. 146-151.

16. Лебедев, В.А. Калориметрический метод экспериментальной оценки энергетического состояния поверхностного слоя упрочнённого методами ППВ / В.А. Лебедев, **В.Д. Соколов**, С.Ю. Штынь // Научно-технические технологии обработки материалов: сб. тр. междунар. науч.-техн. конф. – Ростов н/Д: ДГТУ, 2013. – С. 357-363.

17. Лебедев, В.А. Энергетический подход к обоснованию эффективности упрочнения деталей методами ППВ / В.А. Лебедев, **В.Д. Соколов** // Машиностроение – основа технологического развития России (ТМ2013): сб. науч. ст. V Междунар. науч.-техн. конф. – Курск: Изд-во Юго-Западный гос. ун-т, 2013. – С. 242-246.

18. Лебедев, В.А. Энергетическая оценка физико-механических характеристик поверхностного слоя упрочнённого в условиях виброволнового воздействия / В.А. Лебедев, **В.Д. Соколов**, С.Ю. Штынь // Волновые и виброволновые технологии в машиностроении, металлообработке и других отраслях: сб. тр. междунар. науч. симпозиума технологов-машиностроителей и механиков. – Ростов н/Д: ДГТУ, 2014. – С. 162-167.

19. Лебедев, В.А Калориметрический метод экспериментальной оценки энергетического состояния поверхностного слоя упрочнённого методами ППВ / В.А. Лебедев, **В.Д. Соколов**, С.Ю. Штынь, А.Н. Зацепилин // Жизненный цикл конструкционных материалов (от получения до утилизации): материалы IV Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием. – Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2014. – С. 26-30.

20. **Соколов, В.Д.** Оценка влияния ППВ на повышение эксплуатационных свойств деталей с позиций энергетического подхода / **В.Д. Соколов**, В.А. Лебедев, И.В. Давыдова, А.А. Ломовцев // Интегрированные, виброволновые технологии в машиностроении, металлообработке и других отраслях: сб. тр. междунар. науч. симпозиума технологов-машиностроителей. – Ростов н/Д: ДГТУ, 2015. – С. 122-130.

21. Штынь, С.Ю. Управление механохимическим синтезом процесса нанесения вибрационных механохимических покрытий на основе энергетической модели / С.Ю. Штынь, **В.Д. Соколов** // Виброволновые процессы в технологии обработки деталей высокотехнологичных изделий: сб. тр. по материалам междунар. симпозиума технологов-машиностроителей. – Ростов н/Д: ДГТУ, 2017. – С. 75-79.

22. Лебедев, В.А Энергетический метод оценки влияния ППВ на повышение эксплуатационных свойств деталей / В.А. Лебедев, **В.Д. Соколов**, М.А. Ягмуров, Ф.А. Пастухов // Фундаментальные основы физики, химии и механики наукоёмких технологических систем формообразования и сборки изделий: сб. тр. науч. симпозиума технологов-машиностроителей. – Ростов н/Д: ДГТУ, 2020. – С. 61-65.

В печать 11.04.2023. Формат 60×84/16.
Объем 1,3 усл. п. л. Тираж 100 экз. Заказ № 552

Отпечатано в издательском центре ДГТУ
Адрес университета и полиграфического предприятия:
344003, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1