

На правах рукописи



ПОДОЛЬСКИЙ МАКСИМ АЛЕКСАНДРОВИЧ

**ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРОЧНЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ДИНАМИЧЕСКИМИ
МЕТОДАМИ ППД
НА ОСНОВЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КРИТЕРИЯ**

Специальность 05.02.08 - Технология машиностроения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Ростов-на-Дону, 2005г.

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования Донском государственном техническом университете (ДГТУ) на кафедре «Технология машиностроения».

Научный руководитель: кандидат технических наук,
доцент Лебедев В.А.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор Бутенко В.И.

кандидат технических наук,
доцент Санамян В.Г.

Ведущее предприятие: ОАО «Роствертол»

Защита состоится « 06 » декабря 2005г. в 10-00 час. на заседании диссертационного совета Д 212.058.02 в Донском государственном техническом университете по адресу: 344010, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1, ДГТУ, зал 252.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Донского государственного технического университета по адресу: 344010, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1, ДГТУ.

Автореферат разослан «02» ноября 2005г.

Отзывы на автореферат, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 344010, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1, ДГТУ, диссертационный совет.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук, профессор



Сидоренко В.С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы.

Одной из важнейших задач современного машиностроения является улучшение качества, повышение надёжности и долговечности выпускаемых машин и изделий. Перспективным направлением в обеспечении этих показателей является освоение прогрессивных ресурсосберегающих технологических процессов, позволяющих изготавливать детали с наименьшей себестоимостью и наибольшей производительностью.

Среди множества способов повышения надёжности деталей особое место занимают методы поверхностного пластического деформирования (ППД). Однако, несмотря на многочисленные исследования, в настоящее время не сложилось практических инженерных методик оценки эффективности упрочнения, выбора оптимального метода ППД и режима упрочнения. Все существующие рекомендации по оценке эффективности и подбору оптимального режима упрочнения ППД сводятся к определению глубины упрочнения и параметров обработки, не приводящих к разрушению обрабатываемой поверхности в процессе изготовления. При этом данные рекомендации применимы для определенного метода или группы методов, что затрудняет сравнительный анализ различных методов ППД, и, как следствие, не позволяет обеспечить максимальную надёжность деталей при оптимальных технико-экономических показателях.

Таким образом, актуальность темы обусловлена с одной стороны, практической значимостью и перспективностью широкого применения ППД деталей, а, с другой стороны, необходимостью разработки научно-обоснованной методики оценки эффективности упрочнения ППД. Современные достижения физики позволяют в основу решения этой задачи положить энергетический подход.

Цель исследований.

Повышение эффективности обработки динамическими методами ППД на основе раскрытия энергетической сущности процесса и установления энергетического критерия эффективности упрочнения.

Для достижения поставленной цели были решены следующие основные задачи:

1. На основе анализа явлений, происходящих в поверхностном слое, рассмотрена физическая сущность механизма упрочнения ППД и разработана структурно-энергетическая модель ППД.
2. Выявлен энергетический параметр, способный однозначно и интегрально характеризовать упрочнение и повреждаемость поверхностного слоя в процессе ППД.
3. Обоснован энергетический критерий эффективности упрочнения поверхностного слоя при обработке ППД.
4. Установлена степень влияния на энергетический параметр упрочнения силовых параметров процесса и физико-механических свойств упрочняемой поверхности.

5. Обоснована приемлемость структурно-энергетической модели для оценки эффективности влияния методов упрочнения ППД на повышение качества и эксплуатационных свойств детали.
6. Разработана методика выбора технологических режимов обработки, в основу которой положен энергетический критерий эффективности упрочнения деталей динамическими методами ППД.

Автор защищает:

- Структурно-энергетическую модель упрочнения деталей ППД.
- Энергетический параметр упрочняемости и разрушения поверхностного слоя ППД.
- Энергетический критерий эффективности упрочнения ППД.
- Зависимости энергетического параметра ППД от силовых факторов процесса и качества обрабатываемой поверхности.
- Результаты проверки применимости структурно-энергетической модели для оценки эффективности упрочнения деталей методами ППД.
- Методику расчета технологических режимов ППД.

Общая методика исследований.

В работе использованы теоретические и экспериментальные методы исследования технологии упрочняющей обработки, фундаментальные разработки в области термодинамики, физики металлов и металловедения. Экспериментальные исследования проводились по стандартным и оригинальным методикам в лабораторных условиях. Достоверность предложенных теоретических зависимостей и практических рекомендаций подтверждена анализом экспериментальных данных. При анализе экспериментальных данных широко использовалась ЭВМ.

Научная новизна.

- Предложена структурно-энергетическая модель упрочнения ППД, позволяющая рассчитывать плотность скрытой энергии в поверхностном слое.
- Выявлена зависимость плотности скрытой энергии в поверхностном слое от силовых факторов процесса ППД и качества обрабатываемой поверхности.
- Уточнены теоретические и экспериментальные зависимости, связывающие плотность скрытой энергии с твердостью материала.
- Определена предельно допустимая величина плотности скрытой энергии, при которой достигается наибольший эффект упрочнения и обеспечивается наибольший прирост эксплуатационных свойств деталей в процессе ППД.

Практическая ценность работы.

Предложена обобщенная методика оценки эффективности упрочнения деталей различными методами ППД. Данная методика позволяет назначить оптимальные технологические режимы для уже существующих процессов упрочнения ППД, а также выбрать наиболее эффективный метод ППД при проектировании упрочняющих операций.

Реализация работы.

Методика выбора оптимальных режимов упрочнения внедрена на ООО РТЦ «Технология» на операциях упрочнения рабочих поверхностей зубьев шестерни вибрационно-ударной обработкой.

Апробация работы.

Основные положения диссертации и результаты исследований докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

- международная студенческая научно-техническая конференция «Автоматизация, технология и качество в машиностроении», Украина, Донецк, ДонГТУ, 2001 г.
- всероссийская научно-техническая конференция «Прогрессивные технологии в машино- и приборостроении», Нижний Новгород - Арзамас: НГТУ, 2001г.
- международная научно-техническая конференция, «Высокие технологии в машиностроении», Самара: СамГТУ, 2002г.
- международная научно-техническая конференция, «Вопросы вибрационной технологии», Винница: 2004г.
- научно-техническая конференция «Вопросы вибрационной технологии», Ростов-на-Дону, ДГТУ, 2002г.
- научно-техническая конференция «Вопросы вибрационной технологии», Азов, АТИ ДГТУ, 2004г.

Публикации.

По материалам исследований, представленных в диссертации, опубликовано 8 печатных работ.

Структура и объем работы.

Диссертационная работа состоит из оглавления, введения, четырех глав, основных выводов, списка литературы, включающего 67 наименований, и приложений. Работа содержит 140 страниц машинописного текста, 9 таблиц, 54 рисунка, 2 приложения на 4 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении раскрыта актуальность решаемых в диссертации задач, подчеркнута важность оценки эффективности упрочнения динамическими методами ППД.

В первой главе изложены состояние вопроса и сформулированы задачи исследования, дан обзор основных закономерностей процесса ППД. Проведен анализ предлагаемых критериев эффективности упрочнения и методик оптимизации технологических режимов ППД.

Анализ основных закономерностей процесса ППД показал, что, вне зависимости от метода, в их основе лежит одинаковый механизм деформационного упрочнения поверхностного слоя. Изменение физико-механических характеристик и эксплуатационных свойств деталей

определяется технологическими возможностями метода и зависит от условий энергетического воздействия рабочей среды на поверхность, которые обеспечивают динамические методы ППД. Это позволяет рассматривать различные динамические методы ППД с единых теоретических позиций и предложить обобщенную методику оценки эффективности упрочнения.

На основе обзора работ А.П. Бабичева, Б.П. Рыковского, В.М. Смелянского, В.В. Петросова, Н.В. Олейника, М.М. Саверина, М.Д. Генкина, П.А. Чепы, В.Н. Виноградова и др. установлено:

1. Описание механизмов ППД в основном базируется на механических теориях упругости и пластичности.
2. Расчетно-аналитические зависимости для прогнозирования физико-механических характеристик качества поверхности разработаны на основе допущений и экспериментальных заключений и применимы только для определенных материалов и условий обработки.
3. Предлагаемые в работах критерии эффективности упрочнения в каждом конкретном случае требуют своего уточнения или проведения дополнительных экспериментальных исследований.
4. Предложенные на основе механических теорий пластичности модели механизма ППД квазистатическими методами трудно применимы к описанию механизма ППД динамическими методами. Это обуславливает необходимость разработки критерия эффективности упрочнения только для группы динамических методов ППД.
5. При анализе физической сущности процесса ППД с энергетических позиций не учитываются достижения в области материаловедения, что снижает научную обоснованность расчетных зависимостей.

Из анализа работ посвященных кинетике упрочнения и разрушения твердого тела, термодинамике прочности металлов следует, что проблема прочности и разрушения твердого тела имеет несколько аспектов и относится к компетенции физики твердого тела, материаловедения и механики сплошных деформируемых сред. Несмотря на общность целей и задач, основное содержание и методы исследований данной проблемы физиками, материаловедами и механиками весьма различны. Особого внимания заслуживают исследования В.В. Федорова, В.С. Ивановой, К.А. Осипова, В.А. Павлова и др., которые позволили сделать два важных вывода.

Первый: процесс упрочнения и разрушения металлов при пластической деформации носит феноменологический характер. Феноменологичность заключается в том, что в ходе пластической деформации растет некоторый параметр повреждаемости металла. При этом существует определенная граница, при достижении которой металл начинает разрушаться вне зависимости от интенсивности приложенной нагрузки.

Второй, вытекающий из термодинамической теории прочности, заключается в том, что механизм структурно-фазовых превращений, независимо от физико-химической природы материала и его структуры, а также условий деформирования, является кинетическим процессом, который условно можно разделить на два периода. В первом периоде в металле

накапливаются различного рода дефекты и повреждения кристаллической структуры, одним из основных представителей которых являются дислокации, снижающие пластичность металла, но вместе с тем повышающие прочность детали. Второй период характеризуется разрушением локальных микрообъемов с критической плотностью дефектов и повреждений в виде макро- и микроскопического нарушения сплошности, отслаивания и т.п.

Результаты исследований в области упрочнения и разрушения металлов при пластической деформации и сделанные выводы дают возможность описать кинетическую сущность процесса ППД.

Обозначим через U количественную меру повреждаемости элемента поверхности

в процессе ППД, а через \dot{U} - скорость повреждаемости. Тогда при любом силовом воздействии P повреждаемость U изменяется

со скоростью \dot{U} , которая в общем случае является функцией силового параметра P , времени t , температуры T и других параметров.

По мере деформирования элемента поверхности, его повреждаемость увеличивается. Как только значения параметра U достигает критической величины U^* , происходит максимальное упрочнение поверхностного слоя (Рис. 1а). При дальнейшем деформировании происходит разрушение рассматриваемого элемента.

Зависимость нагрузки P , которую необходимо приложить для того, чтобы разрушить образец за время t показана на рисунке 1б. Такие кривые могут быть построены для любого уровня поврежденности $U \leq U^*$. Величина P_r соответствует максимальному давлению, при котором еще не может произойти разрушение образца, за сколько угодно большое число циклов нагружения. U_0 - уровень поврежденности уже присутствующий в образце к моменту начала искажения.

Из графиков, приведенных на рисунке 1 следует, что интенсивность повреждаемости \dot{U} и продолжительность обработки зависят от уровня приложенной нагрузки P , что позволяет представить условие максимального упрочнения поверхностного слоя в виде:

$$U = U_0 + \int_0^t \dot{U} dt = U^* = const. \quad (1)$$

Представленное условие позволяет предсказать время обработки до достижения в поверхностном слое предельной степени упрочнения, если

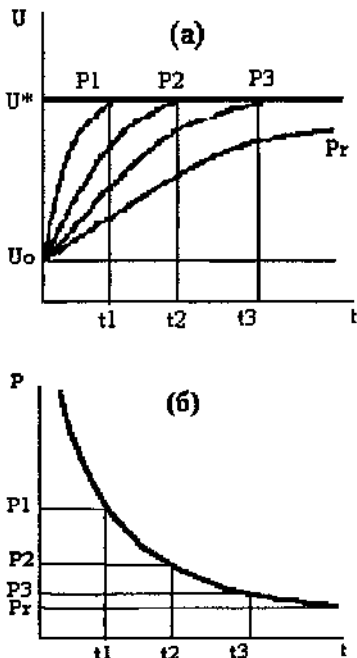


Рис. 1. Кинетическая сущность ППД.

известна функция накопления повреждений от технологических параметров процесса $U(P, t, T, i, \dots)$.

В качестве физической величины, определяющей предельную повреждаемость поверхностного слоя в процессе ППД, могут быть использованы такие величины как ресурс пластичности, плотность дислокаций, работа пластической деформации и плотность скрытой энергии. Поэтому выявить параметр, способный однозначно и интегрально характеризовать упрочнение и повреждаемость поверхностного слоя в процессе ППД динамическими методами, являлось одной из основных задач настоящих исследований.

Кроме того, для оценки эффективности упрочнения деталей динамическими методами ППД необходимо:

- определить предельную величину данного параметра, соответствующую наиболее эффективному упрочнению ППД;
- установить степень влияния на выбранный параметр упрочнения силовых параметров процесса и физико-механических свойств упрочняемой поверхности;
- обосновать применимость выбранного параметра и разработать методику выбора технологических режимов упрочнения динамическими методами ППД.

Во второй главе предложена модель, раскрывающая структурно-энергетическая сущность процесса ППД, предложен параметр и критерий оценки эффективности упрочнения.

При пластической деформации в металле накапливается некоторая доля энергии деформации. Эту долю энергии принято называть скрытой энергией.

На большом экспериментальном материале установлено, что плотность скрытой энергии в металле тесно связана с его характеристиками прочности, пластичности, долговечности и износостойкости.

Поверхностный слой при обработке деталей методами ППД формируется в результате сложных взаимосвязанных явлений, прежде всего, структурно-фазовых, происходящих в локальных очагах деформирования. Независимо от силы удара, формы и длительности импульса сжатия и других характеристик процесса ППД, степень упрочнения всегда зависит от количества искажений, остающихся в кристаллической решетке после прохождения импульса сжатия с ударной волной. Известно, что каждая дислокация и другие дефекты и повреждения создают вокруг себя поле упругих напряжений, а на их образование в материале затрачивается строго определенная работа внешних сил A_i . Следовательно, каждый из указанных дефектов является носителем избыточной потенциальной энергии E_i . Это обуславливает изменение потенциальной составляющей внутренней энергии ΔE_p деформируемых объемов материала и приводит их в процессе ППД в неустойчивое энергетическое состояние. Эта энергия передается элементарным структурным единицам и их комплексам, главным образом, за счет флуктуации тепловой энергии. А при ударных методах деформации энергия активации также подводится в виде ударной волны.

Каждый элементарный акт перегруппировок структурных частиц,

вызванный флуктуацией тепловой энергии, сопровождается локальными перемещениями и изменениями конфигурации в их расположении. В связи с этим все многообразие элементарных актов с микроскопической точки зрения можно разделить на три характерные группы:

- акты связанные с образованием и накоплением элементарных дефектов;
- акты движения элементарных дефектов, сопровождающиеся разрывом межатомных связей в одном месте, с одновременным их восстановлением в другом;
- акты взаимодействия и уничтожения элементарных дефектов.

Элементарные акты, связанные с образованием дефектов, сопровождаются статическими искажениями структуры и приводят к флуктуациям потенциальной энергии. Поэтому каждый элементарный дефект является носителем избыточной потенциальной энергии, а накопление в макроскопическом объеме тела различного рода дефектов сопровождается возрастанием (увеличением) потенциальной составляющей внутренней энергии, называемой обычно скрытой, запасенной энергией. Наоборот, элементарные акты, связанные с взаимодействием и уничтожением элементарных дефектов, сопровождаются высвобождением скрытой энергии и трансформацией (превращением) ее в тепловую.

По мере увеличения плотности скрытой энергии, накапливаемой в локальных объемах материала, при возврате все большая и большая часть дефектов успевает уничтожиться в процессе самой деформации. На рисунке 2 представлена схема накопления металлом энергии при пластической деформации. Первая часть работы пластической деформации A_p связана с изменением в деформируемых объемах материала скрытой (потенциальной) энергии ΔE_p различного рода элементарных дефектов и повреждений, зарождающихся и накапливающихся в деформируемом элементе тела. Эта энергия является однозначной и интегральной характеристикой тех субмикро- и микроструктурных изменений, которые протекают в пластически деформируемых объемах материала. Она, следовательно, является так же мерой деформационного упрочнения и повреждаемости материала.

Вторая часть работы пластических деформаций A_p связана с процессами динамического возврата, сопровождающимися высвобождением скрытой энергии и тепловым эффектом пластической деформации q . Эта энергия связана с движением и уничтожением (аннигиляцией) различного рода элементарных дефектов противоположных знаков, выходом их на поверхность, залечиванием обратимых (неустойчивых) субмикроскопических нарушений сплошности и т. д.

Значительная часть энергии, связанной с тепловым эффектом пластической деформации, не задерживается в деформируемых объемах материала, проходит «транзитом» и рассеивается в окружающей среде за счет теплообмена q . Другая часть этой энергии задерживается (накапливается) в деформируемых объемах материала (повышая их температуру T), что приводит к изменению тепловой составляющей внутренней энергии ΔE_T .

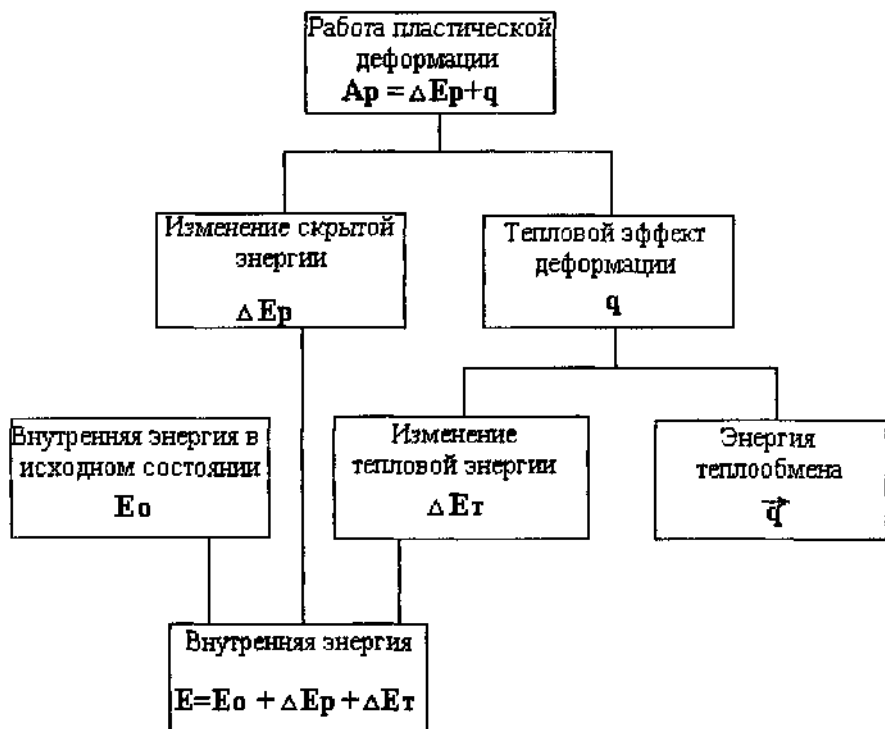


Рис. 2. Схема распределения энергии при пластической деформации.

Важным результатом, вытекающим из энергетического анализа процесса пластической деформации, является вывод о том, что в качестве одного из параметров, однозначно и интегрально характеризующих структурное состояние деформируемых объемов твердого тела, является плотность потенциальной (скрытой) составляющей внутренней энергии E_p , накапливаемой в материале.

В соответствии с энергетическим анализом процесса пластической деформации, упрочнения и разрушения реальных твердых тел, а так же с учетом многочисленных экспериментальных данных и теоретических положений в области физики и механики деформируемых твердых тел, предлагается следующая структурно-энергетическая модель упрочнения твердых тел при ПГД.

1. Твердое тело рассматривается как сплошная, однородная и изотропная среда, в объемах которой статистически равномерно распределены структурные элементы и различного рода дефекты и повреждения;
2. Макроскопическое явление пластической деформации элемента поверхностного слоя рассматривается как совокупность большого числа микроскопических элементарных актов атомно-молекулярных перегруппировок, связанных с генерированием (размножением) источниками, движением,

взаимодействием и уничтожением на стоках различного рода элементарных дефектов.

3. Явление упрочнения и разрушения поверхностного слоя при ППД рассматривается как конкуренция двух противоположных, взаимосвязанных и одновременно протекающих в деформируемых объемах тела процессов: роста плотности скрытой энергии E_p различного рода дефектов и повреждений, накапливающихся в материале за счет работы внешних сил A_p , и снижения (высвобождения) ее за счет различного рода релаксационных процессов, протекающих внутри деформируемого элемента тела.

Таким образом, при оценке энергетического состояния упрочненного ППД материала, мы приходим к выводу о том, что однозначной и интегральной характеристикой состояния деформируемых объемов материала в процессе ППД является плотность внутренней энергии. Поэтому, в качестве параметра упрочнения ППД и критерия разрушения, в наиболее общем случае, следует принять плотность скрытой энергии E_p , и ее изменение в процессе деформирования вплоть до разрушения.

Эффективность упрочнения методами ППД, в практическом плане, чаще всего оценивается повышением износостойкости и предела усталостной прочности деталей. Как показывают исследования, износостойкость детали напрямую зависит от твердости поверхностного слоя. На увеличении предела усталости (долговечности) твердость поверхности также оказывает положительное влияние. Поэтому при определении энергетического критерия эффективности процесса ППД, мы рассматриваем такое состояние материала поверхностного слоя, при котором плотность дислокаций в нем наибольшая, а, следовательно, плотность скрытой энергии максимальна.

Для определения величины плотности скрытой энергии, соответствующей принятому критерию эффективности, в работе использована энергетическая аналогия между процессами поглощения энергии кристаллической решеткой при механическом нагружении до разрушения и при нагреве металлов до состояния полного расплавления. В работах К.А. Осипова и В.С. Ивановой экспериментально подтверждены гипотезы о том, что величина скрытой энергии в металле при его разрушении в условиях многоциклового усталости и износа соответствует количеству энергии, необходимой для его плавления. И в том, и в другом случае нарушение межатомных связей наступает в результате поглощения предельной для данной кристаллической решетки величины энергии. При разрушении путем механического нагружения, как и при плавлении, процессу нарушения межатомных связей предшествует искажение кристаллической решетки до предельной величины. Различие состоит в том, что при механическом нагружении предельное искажение кристаллической решетки обусловлено скоплением в локальных объемах металла критической плотности дислокаций, при которой дальнейшее поглощение энергии кристаллической решеткой приводит к нарушению межатомных связей. Таким образом, работа механического разрушения может быть определена выражением:

$$A = \int_0^{T_s} C_p dT + L_s = \Delta H_s + L_s \quad (2)$$

где A – работа разрушения; C_p – теплоемкость; T_s – температура плавления; L_s – теплота плавления; ΔH_s – разница энтальпии металла в состоянии расплава и твердом состоянии при нормальных условиях.

Тогда предельная удельная энергия искажения кристаллической решетки будет равна:

$$E_{np}^{uck} = \int_{T_0}^{T_s} C_p dT, \quad (3)$$

а удельная энергия нарушения межатомных связей в предельно искаженной решетке равна теплоте плавления $L_{пл}$.

Основная трудность при сопоставлении энергии плавления и энергии механического разрушения заключается в том, что в процессе нагрева и плавления энергия поглощается кристаллической решеткой практически равномерно по всему объему металла. В случае механического нагружения, вследствие анизотропии свойств и несовершенства строения кристаллической решетки, происходит неоднородное поглощение энергии. Поэтому, сопоставление энергоемкости металла при плавлении и при механическом нагружении возможно лишь на уровне тех локальных микрообъемов металла, которые насыщены энергией предельной величины.

При рассмотрении энергетического состояния материала, подвергаемого нагрузкам, необходимо также учитывать тепловую составляющую внутренней энергии, даже при комнатной температуре. Таким образом, в качестве критерия максимальной эффективности ППД - критерия предельной поврежденности поверхностного слоя - следует принять предельную величину скрытой энергии, накопленную в рассматриваемом элементе поверхностного слоя, равную разности энтальпии данного материала в твердом состоянии при температуре плавления и энтальпии при 293 °К:

$$E_p = H_{T_s} - H_{293} = H^*, \quad (4)$$

где H_{T_s} – энтальпия металла в твердом состоянии при температуре плавления, H_{293} – энтальпия металла при нормальных условиях (293° К).

Данный критерий описывает упрочнение, достигаемое в результате ППД с учетом предшествующих обрабатывающих операций, то есть учитывает «наследственность» материала.

Используя предложенный энергетический критерий эффективности и предположив, что скрытая энергия распределяется в упрочняемом слое по линейному закону (Рис. 3):

$$E_p(h) = E_{p0} + \Delta E_p (1 - h / h_s), \text{ МДж/м}^3 \quad h_s \geq h \geq 0, \quad (5)$$

где h_s – глубина наклепа, мм; E_{p0} – исходная плотность скрытой энергии,

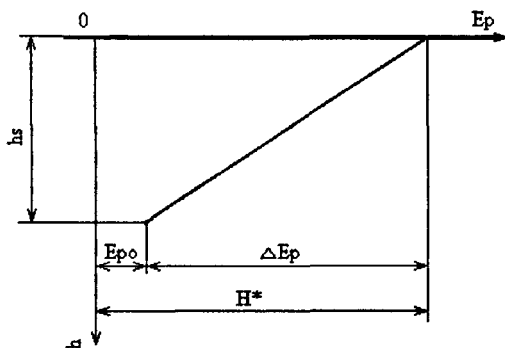


Рис. 3 Схема распределения скрытой энергии в упрочненном слое

получено уравнение для расчета удельной энергии, которую необходимо подвести к единице площади поверхностного слоя за время обработки t с целью его эффективного упрочнения:

$$E_{уд}(m, V, D \dots) \cdot t = \Delta E_p / ((1 - K_y) \cdot (1 - K_T)) = 0.5 h_s (H^* - E_{p0}) / ((1 - K_y) \cdot (1 - K_T)), \text{ МДж/м}^2, \quad (6)$$

где ΔE_p - количество энергии, запасенное в участке поверхностного слоя единичной площади при упрочнении до достижения оптимальной степени упрочнения:

$$\Delta E_p = 0.5 h_s (H^* - E_{p0}), \text{ МДж/м}^2 \quad (7)$$

K_y - коэффициент упругого восстановления:

$$K_y = E_{отск} / E_y = (V_{отск} / V_y)^2, \quad (8)$$

где $E_{отск}$ - энергия отскока, м/с; E_y - энергия удара, м/с; $V_{отск}$ и V_y - скорости отскока и удара соответственно, м/с.

K_T - коэффициент тепловых потерь:

$$K_T = \Delta E_p / E_{пл}, \quad (9)$$

где $E_{пл}$ - энергия затраченная на пластическую деформацию.

В ходе обработки, с накоплением скрытой энергии в локальном объеме поверхностного слоя и изменением его физико-механических свойств, изменяются коэффициенты и глубина наклепа, т.е. $K_y = f(E_p)$, $K_T = f(E_p)$, $h_s = f(E_p)$.

Учитывая это обстоятельство, уравнение энергетического баланса приобретает следующий вид:

$$E_{уд}(m, V, D \dots) \cdot t = 0.5 \int_{E_{p0}}^{H^*} \frac{h_s(E_p)}{(1 - K_y(E_p))(1 - K_T(E_p))} dE_p \quad (10)$$

Исследование влияния технологических факторов и физико-механических характеристик обрабатываемого металла на коэффициент упругого восстановления и коэффициент тепловых потерь, позволил сделать вывод, что на K_y существенно влияет твердость поверхностного слоя детали:

$$K_y = K_{Hv} = 0.15 + 0.85 \cdot (HV - HV_{\min}) / (HV_{\max} - HV_{\min}), \quad (11)$$

а влиянием скорости и угла соударения, размерами и формой рабочего тела, шероховатостью обрабатываемой поверхности можно пренебречь.

Коэффициент тепловых потерь зависит от степени упрочнения и температуры детали. При этом скорость деформации на K_t практически не оказывает влияния, а влияние химического состава сплава проявляется через изменение твердости поверхностного слоя:

$$K_t = (1 - (3t / T_p)^{0.25}) \cdot (HV - HV_{\text{отож}}) / (HV_{\text{закал}} - HV_{\text{отож}}). \quad (12)$$

Для оценки твердости наиболее упрочненных локальных микрообъемов поверхностного слоя предложена зависимость:

$$HV_m = HV \cdot \left(\frac{HV_{\max}}{HV} \right)^{0.95}, \quad (13)$$

где HV – текущая твердость металла, HV_{\max} – максимальная твердость для сплавов на данной основе (железо, алюминий, магний, титан и т.д.).

Используя твердость поверхностного слоя металла для косвенной оценки плотности скрытой энергии, В.В. Федоровым предложена следующая зависимость:

$$E_p = M \cdot HV^C, \quad (14)$$

где HV твердость металла по Виккерсу, МПа; C – коэффициент зависящий от материала детали;

$$M = \frac{1}{6G} \left(\frac{0.067}{1.2 \cdot 10^{-3} + 6.47 \cdot 10^{-6} HV_0} \right)^2, \quad (15)$$

где G – модуль сдвига, МПа; HV_0 – твердость металла в исходном (отожженном) состоянии.

Выразив твердость через плотность скрытой энергии получим:

$$HV = \sqrt[3]{E_p / M}. \quad (16)$$

С учетом данного выражения, формулы для расчета коэффициентов K_y и K_t представлены в следующем виде:

$$K_y(E_p) = 0.15 + 0.85 \cdot (\sqrt[3]{E_p / M} - HV_{\min}) / (HV_{\max} - HV_{\min}), \quad (17)$$

$$K_t(E_p) = (1 - (3t / T_p)^{0.25}) \cdot (\sqrt[3]{E_p / M} - HV_{\min}) / (HV_{\max} - HV_{\min}) \quad (18)$$

Для определения глубины распределения скрытой энергии в поверхностном слое, на основе преобразования зависимости Олейника, предложено выражение связывающее глубину упрочненного слоя с твердостью металла:

$$h(E_p) = 1.54 \sqrt[4]{\frac{6D \cdot E_y}{\sqrt[3]{E_p / M}}}. \quad (19)$$

Решение уравнения энергетического баланса (10) рекомендуется производить численными методами с использованием ЭВМ.

В третьей главе приводятся результаты анализа влияния ППД на повышение физико-механических характеристик и эксплуатационных свойств деталей с позиции структурно-энергетической модели. Проведена проверка приемлемости структурно-энергетической модели для оценки эффективности упрочнения.

Проверка осуществлялась как на основе экспериментальных исследований, так и на основе обобщения результатов исследований по упрочнению деталей наиболее распространенными динамическими методами ППД свободно движущимися телами, представленных в литературных источниках.

Экспериментальные исследования проводились на вибростанке в среде стальных шаров. Результаты экспериментов приведены на рис 4; 5. Время достижения максимальной микротвердости для образцов из сплава АК6Т-1 составило 30 минут, для образцов из стали 40Х и стали 20 - 170 и 160 минут соответственно. Расчетное время упрочнения составило 32, 176 и 176 минут соответственно. Таким образом, погрешность экспериментальных данных и расчетных значений находится в пределах 7- 10%. Испытания на усталость показали, что наибольшая долговечность групп образцов достигается при обработке в течении расчетного времени.

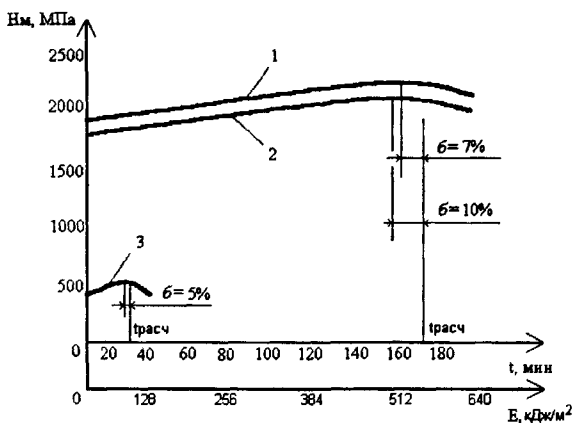


Рис. 4. Прирост микротвердости на поверхности образца в зависимости от времени обработки и подводимой энергии деформирования
 1 – Сталь 40Х; 2 – Сталь 20;
 3 – АК6Т – 1.
 $D=6\text{ мм}$, $A=3.5\text{ мм}$,
 $\gamma = 33\text{ Гц}$
 $E_{уд} = 3\ 189\text{ кДж/м}^2\text{мин}$

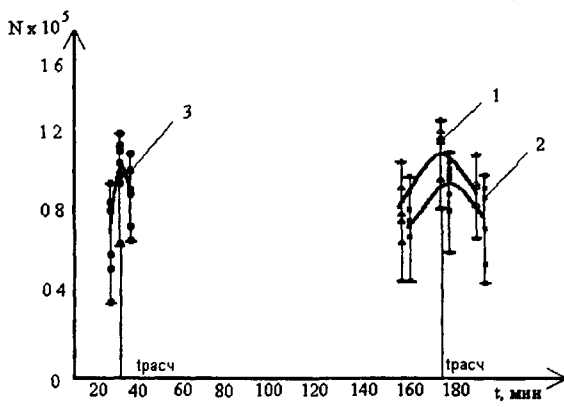


Рис. 5.
 Долговечность образцов в зависимости от времени упрочнения.
 1 – Сталь 40Х, $\sigma = 200\text{ МПа}$,
 2 – Сталь 20, $\sigma = 200\text{ МПа}$;
 3 – АК6Т – 1, $\sigma = 180\text{ МПа}$

Из литературных источников проанализированы экспериментальные данные по вибрационно-ударной обработке, пневмо- и гидродробеструйному упрочнению, дробеметной обработке и упрочнению микрошариками. Результаты анализа экспериментальных данных, изложенных в литературных источниках, приведены в таблице.

Метод ППД	Материал	Удельная энергия, кДж/м ² ·мин	Время обработки до получения HVmax, мин.	Расчетное время обработки до HVmax, мин.	Погрешность расчетного значения, %.
ВиУО	30Х3ВА	3,195	120	109	9,5
ВиУО	ШХ-15, 40Х, Ст.45	3,515	180 130 160	108 134 164	40 3,5 2,5
ВиУО	16Х3НВФБ	2,347	90	88	2,5
ВиУО	X12M, P18	5,073	60	62	3,3
ВиУО	АВТ-1	1,63	45	51	12
ГДУ	12Х2НВФА	18	4	3,49	13
ГДУ	12Х2НВФА	12	6	6,16	6
ГДУ	16Х3НВФБ	15	5	5,68	13,6
ДМУ ¹	12Х2Н4А	160	2	1,9	5
УМШ	25Н20	40	1	1,06	6

¹ Максимум контактной выносливости соответствует максимуму поверхностной микротвердости

Проведенные исследования показали:

1. Предложенная структурно-энергетическая модель позволяет рассчитывать оптимальное время обработки деталей из механически упрочняемых сплавов с точностью 10 ... 15%.
2. Долговечность образцов с максимальной твердостью поверхностного слоя, полученная на основе энергетического критерия эффективности, наибольшая как при испытаниях на многоцикловую усталость, так и при испытаниях на контактную выносливость. Следовательно, энергетический критерий эффективности, связанный с величиной микротвердости, адекватно отражает упрочнение поверхностного слоя и образца в целом.
3. Прирост микротвердости поверхностного слоя зависит не только от длительности обработки, но и от интенсивности упрочнения. При увеличении скорости деформирования и диаметра частиц рабочей среды не только сокращается время упрочнения, но и увеличивается наклеп, что позволяет применять более жесткие режимы упрочнения деталей, ограниченные только конструктивными особенностями детали и технологическими возможностями оборудования.

Вышесказанное позволяет рекомендовать предложенную структурно-энергетическую модель и энергетический критерий эффективности для выбора наиболее эффективных технологических режимов упрочнения ППД деталей из материалов склонных к упрочнению.

В четвертой главе разработана методика выбора оптимальных режимов упрочнения на основе энергетического критерия и приведены результаты практического применения.

Методически последовательность выбора оптимальных режимов упрочнения строится следующим образом:

1. Определение энергетического критерия максимальной эффективности ППД, H^* . Ниже приведены значения H^* для металлов наиболее часто применяемых в качестве основы сплавов:

Металл	H^* , МДж/м ³
Железо	10500
Алюминий	1800
Титан	5250
Медь	4150

2. Выбор скорости единичного соударения и диаметра элемента рабочей среды, обеспечивающих достижение требуемой глубины упрочненного слоя по формуле:

$$\sqrt{VD}^2 = \frac{h_s^2}{1.5 \cdot 10^{-3}} \cdot \sqrt[4]{\frac{HV_0}{4 \cdot 10^6 \cdot \pi \cdot \rho}} \quad (20)$$

3. Определение величины удельной энергии деформирования на основе математической модели выбранного для упрочнения метода ППД, Дж/м².

Для ПДУ, ГДУ, УМШ и ДМУ модель процесса имеет вид:

$$E_{уд}(m, V, D...) = \frac{Q \cdot V^2}{2g \cdot S_n}, \text{ кДж/м}^2 \cdot \text{мин} \quad (21)$$

где Q - весовой расход дроби в единицу времени, Н / мин; g - ускорение свободного падения, м / с²; S_n - площадь поверхности упрочняемая пучком дроби, м².

Для ВиУО:

$$E_{уд}(m, V, D...) = \frac{0,25 \cdot m \cdot V^2 \cdot 60 \cdot f}{2000 \cdot D^2}, \text{ кДж/м}^2 \cdot \text{мин} \quad (22)$$

где 0,25 - коэффициент учитывающий неравномерность энергии удара; m - масса шарика, кг; f - частота колебаний, Гц; D - диаметр шарика, м.

4. Определение твердости и плотности скрытой энергии наиболее упрочненных локальных микрообъемов металла, HV_m , $E_{рт}$ по зависимостям (13, 14).

5. Определение предельной энергии, которую необходимо подвести к поверхностному слою для его эффективного упрочнения, $E(H^*)$, по уравнению энергетического баланса (10).

Ниже приведены справочные значения твердости, модуля сдвига и коэффициента C для наиболее часто применяемых металлов:

Металл	HV_{min} , МПа	HV_{max} , МПа	C	G , 10 ⁴ МПа
Железо	1000	11000	1.94	8
Алюминий	500	2000	1.85	2.65
Титан	1300	4350	2.05	4.25
Медь	690	2400	2.04	4.2

6. Определение времени обработки детали.

$$T = 1000 \frac{E(H^*)}{E_{уд}(m, V, D...)}, \text{ минут.} \quad (23)$$

Предложенная методика относительно универсальна, так как позволяет оптимизировать упрочняющие операции с применением практически любых динамических методов ПГД и рассчитывать оптимальное время упрочнения с погрешностью не более 10 ... 15%. Это позволяет рекомендовать ее к применению не только для дальнейших научных разработок, но и для оптимизации существующих и проектируемых производственных процессов, связанных с упрочнением деталей динамическими методами ПГД.

Для практического применения предложена программа расчета основного времени упрочняющей обработки. Программа разработана в среде программирования Mathcad 2000, что делает ее весьма наглядной и простой для применения. Использование данной программы позволяет значительно сократить время опытной и технологической подготовки производства. Методика и программа выбора режимов эффективного упрочнения внедрена на ООО РТЦ «Технология» на операциях упрочнения рабочих поверхностей зубьев шестерни.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1. Предложенная структурно-энергетическая модель упрочнения поверхностного слоя при обработке ПГД позволяет прогнозировать плотность скрытой энергии, накапливаемой в поверхностном слое для механически упрочняемых сплавов.
2. При обработке динамическими методами ПГД в локальных объемах поверхностного слоя за счет возникающих дефектов кристаллической решетки накапливается внутренняя скрытая энергия, ответственная как за упрочнение, так и за разрушение металла.
3. Скрытая энергия, накапливаемая в поверхностном слое при ПГД, является параметром однозначно и адекватно характеризующим процесс упрочнения.
4. В качестве энергетического критерия эффективности упрочнения ПГД может быть принята величина предельной плотности скрытой энергии, запасенной в локальном микрообъеме поверхностного слоя, равная разности энтальпии данного материала в твердом состоянии при температуре плавления и при 293 °К.
5. Рост плотности скрытой энергии зависит от режимов упрочнения определяемых технологическими возможностями метода ПГД, а также твердости материала и других технологических параметров процесса.
6. Структурно-энергетическая модель и энергетический критерий эффективности упрочнения ПГД позволяют с погрешностью 10 - 15 % оценить эффективность упрочнения деталей динамическими методами ПГД.
7. Предложенная методика и программа выбора технологических режимов позволяет с использованием ЭВМ выбирать эффективные технологические режимы операций упрочнения динамическими методами ПГД.

Основное содержание диссертации отражено в следующих работах:

1. Лебедев В.А. Теоретико-вероятностная модель обработки деталей динамическими (ударными) методами ППД / Лебедев В.А., Прокопец Г.А., Подольский М.А. // Прогрессивные технологии в машино- и приборостроении: сб. ст. по материалам Всерос. науч. - техн. конф., 12 -15 мая. - Ниж. Новгород: НГТУ, 2000. - С. 26 -29.
2. Подольский М. А. Структурно-энергетическая интерпретация процесса ППД / Подольский М.А., Лебедев В.А. // Инженер: Студ. науч. - техн. журнал – Донецк: ДонГТУ, 2001. - № 2 - С. 110 - 115.
3. Лебедев В.А. Структурно-энергетическая интерпретация процесса ППД / Лебедев В.А., Подольский М. А. // Прогрессивные технологии в машино- и приборостроении: сб. ст. по материалам Всерос. науч. - техн. конф., 15 -17 мая. - Ниж. Новгород - Арзамас: НГТУ, 2001. - С. 152 – 156.
4. Лебедев В.А. Основы проектирования типовых технологических операций ППД / Лебедев В.А., Прокопец Г.А., Подольский М. А. // Качество машин: сб. науч. тр. междунар. науч. - техн. конф., 10 - 11 мая - Брянск БГТУ, 2001. – С. 72 – 74.
5. Подольский М. А. Методика оптимизации режимов упрочнения ППД на основе термодинамического критерия эффективности / Подольский М. А. // Высокие технологии в машиностроении: материалы Мждунар науч. - техн. конф., 19 - 21 ноября. - Самара: СамГТУ, 2002. - С.97 - 100.
6. Лебедев В.А. Оценка эффективности упрочнения деталей методами ППД на основе термодинамических представлений процесса / Лебедев В.А., Подольский М. А. // Вестник машиностроения. М.: 2004. - №6. - С. 63 - 65.
7. Подольский М. А. Анализ экспериментальных данных с позиций термодинамической модели упрочнения ППД / Подольский М. А. // Вопросы вибрационной технологии: межвузовский сб. ст. - Ростов-на-Дону: ДГТУ 2004. - С. 78 - 82.
8. Мищенко Р.А. Модель выбора ППД при оптимизации операции упрочнения / Мищенко Р.А., Подольский М. А. // Вопросы вибрационной технологии: межвузовский сб. ст. - Ростов-на-Дону: ДГТУ 2004. - С. 115 - 120.

Печать цифровая. Бумага офсетная. Гарнитура «Ариал».

Формат 60x84/16. Объем 1,0 уч.-изд.-л.

Заказ № 706. Тираж 100 экз.

Отпечатано в КМЦ «КОПИЦЕНТР»

344006, г. Ростов-на-Дону, ул. Суворова, 19, тел. 250.11.25

№ 2 1 6 3 0

РНБ Русский фонд

2006-4

22736