

*На правах рукописи*



Прокофьев Максим Алексеевич

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ НАКЛЕПА  
ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛЕЙ ПРИ ШЛИФОВАНИИ  
НА ОСНОВЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СКРЫТОЙ ЭНЕРГИИ ДЕФОРМАЦИИ**

Специальности 05.02.08 – Технология машиностроения,  
05.03.01 – Технологии и оборудование  
механической и физико-технической  
обработки

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Рыбинск – 2006

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования – Рыбинской государственной авиационной технологической академии имени П. А. Соловьева на кафедре «Технология авиационных двигателей, общего машиностроения и управления качеством»

Научный руководитель: заслуженный деятель науки и техники Российской Федерации, доктор технических наук, профессор  
Безъязычный Вячеслав Феоктистович

Научный консультант кандидат технических наук, доцент  
Драпкин Борис Михайлович

Официальные оппоненты: заслуженный деятель науки Российской Федерации, доктор технических наук, профессор  
Рыкунов Николай Стефанович

доктор технических наук, профессор  
Бутенко Виктор Иванович

Ведущая организация ОАО «НПО «Сатурн», г. Рыбинск

Защита диссертации состоится «8» ноября 2006 г. в 12 часов на заседании диссертационного совета Д 212.210.01 в Рыбинской государственной авиационной технологической академии имени П. А. Соловьева по адресу: 152934, г. Рыбинск, Ярославской области, ул. Пушкина, 53, ауд. Г-237

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Рыбинской государственной авиационной технологической академии имени П. А. Соловьева.

Автореферат разослан «6» октября 2006 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Конюхов Б. М.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### *Актуальность темы.*

Одним из главных направлений развития современного машиностроения является освоение прогрессивных технологий достижения заданных показателей качества поверхностного слоя металлов и сплавов, определяющих эксплуатационные свойства изделий.

Благодаря фундаментальным работам большого круга учёных, достигнуты значительные успехи в области изучения качества поверхностного слоя, формируемого в процессе механической обработки. В частности, установлены основные зависимости изменения параметров качества поверхностного слоя от условий обработки, созданы предпосылки и положено начало выявлению физической сущности явлений, происходящих при формировании поверхностного слоя. Однако, всё ещё не решёнными являются задачи, требующие глубоких теоретических и экспериментальных исследований, и среди них – разработка методов расчета характеристик качества поверхностного слоя, формируемых в процессе обработки с учётом технологических параметров.

Настоящая работа посвящена поиску способов достижения показателей качества поверхностного слоя деталей машин, которые определяют работоспособность изделия при его эксплуатации. В работе явление пластической деформации изучено на основе физики процесса с использованием основных положений теории дислокаций. В ходе анализа существующих и собственных экспериментальных исследований получены данные, позволившие обнаружить закономерности изменения скрытой энергии деформации в зависимости от различных факторов. В результате исследований сформулирован энергетический критерий, на основе которого разработаны научно-обоснованные практические рекомендации по назначению режимов шлифования.

**Цель работы.** Технологическое обеспечение параметров наклепа поверхностного слоя деталей на основе оптимизации режимов механической обработки по энергетическому критерию, построенному на закономерностях изменения скрытой энергии деформации.

Для достижения цели необходимо было решить следующие задачи:

1) Выявить общие закономерности механизма накопления поверхностными слоями материала энергии на основе существующих и собственных исследований в области изучения скрытой энергии при пластической деформации металлов и сплавов.

2) Выбор и описание методов экспериментального исследования параметров состояния поверхностного слоя материала после различных видов механической обработки.

3) Проведение экспериментальных исследований влияния различных ус-

ловий механической обработки на величину скрытой энергии деформации для разных групп материалов.

4) На основании общих закономерностей изменения скрытой энергии при пластической деформации и результатов проведенных экспериментальных исследований сформулировать энергетический критерий, характеризующий качество поверхностного слоя деталей.

5) Разработать научно-обоснованные практические рекомендации по обеспечению параметров наклепа поверхностного слоя деталей применительно к процессу шлифования.

*Основные положения, выносимые на защиту:*

- закономерности изменения скрытой энергии деформации при пластическом деформировании металлов и сплавов;
- математическая модель расчета скрытой энергии деформации по параметрам кривой деформационного течения материала;
- энергетический критерий, характеризующий качество поверхностного слоя деталей при механической обработке;
- метод определения упрочнения по глубине поверхностного слоя деталей;
- методика оптимизации режимов плоского шлифования материалов по заданным величинам параметров наклепа поверхностного слоя деталей.

*Общая методика исследований.*

Работа основана на теоретических и экспериментальных методах исследования процесса накопления скрытой энергии деформации поверхностными слоями материалов при пластической деформации. При проведении исследований использовались фундаментальные разработки в области физики твердого тела, теории дислокаций. Эксперименты проводились по стандартным и разработанным автором оригинальным методикам исследования поверхностного слоя. Анализ экспериментальных данных производился с использованием современных программных продуктов, таких как Mathcad, Statistica и др.

*Научная новизна.*

Выявлены основные закономерности изменения скрытой энергии деформации, на основании которых предложен и научно обоснован энергетический критерий, характеризующий качество поверхностного слоя деталей при механической обработке.

*Практическая ценность и реализация результатов работы.*

Предложена комплексная методика оптимизации режимов плоского шлифования периферией круга по заданным величинам параметров наклепа поверхностного слоя деталей. Результаты исследований приняты к использованию на ОАО НПО «Сатурн» в качестве методических рекомендаций на операциях плоского шлифования деталей из жаропрочных сплавов.

### *Апробация работы.*

Основные положения и результаты выполненной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: Всероссийская научно-техническая конференция «Аэрокосмические технологии и образование на рубеже веков», Рыбинск, 2002 г.; Международная конференция «XXIX Гагаринские чтения», Москва, 2003 г.; X Международная научная конференция «Теплофизика технологических процессов», Рыбинск, 2004 г.; Международный симпозиум «Славянтрибо-6», Санкт-Петербург – Пушкин, 2004 г.

Отдельные результаты работы обсуждались во время прохождения стажировки в Краковской горно-металлургической академии им. С. Сташица, Краковском технологическом институте и в Радомском институте технологии и эксплуатации, Польша.

### *Публикации.*

По теме диссертации опубликовано 23 работ, в том числе 9 – в центральных журналах.

### *Структура и объем работы.*

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, общих выводов по работе, списка использованных источников. Объем работы – 200 страниц машинописного текста, включающего 69 рисунков, 23 таблицы, 116 формул, списка использованных источников из 130 наименований.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

*Во введении* обоснована актуальность темы диссертационной работы, дана краткая характеристика направлений исследований, научного и практического значения решаемой проблемы.

*В первой главе* на основе анализа существующих исследований показано, что решение задачи установления функциональной зависимости (теоретической или экспериментальной), наиболее полно отражающей влияние технологических условий обработки на характеристики состояния поверхностного слоя, имеет особое значение. Результаты исследования поверхностного слоя после механической обработки изложены в работах А. П. Бабицева, В. Ф. Безъязычного, Д. И. Волкова, А. В. Подзея, М. И. Евстигнеева, М. В. Касьяна, Б. Н. Костецкого, И. В. Крагельского, Б. А. Кравченко, И. В. Кудрявцева, А. Д. Макарова, А. А. Маталина, В. С. Мухина, Н. С. Рыкунова, В. К. Старкова, А. М. Сулимы, А. Г. Сулова и др. Упомянутыми выше учеными достигнуты значительные успехи в области изучения качества поверхностного слоя, формируемого в процессе механической обработки.

Экспериментальные зависимости определения параметров наклепа тради-

ционно обладают невозможностью их широкого практического применения. Основное внимание теоретических зависимостей, построенных на решении задач теорий упругости, пластичности и подобия направлены на определение глубины наклепа. Степень же наклепа в этих исследованиях остается за рамками внимания. В тоже время, особое внимание к степени наклепа, как степени изменения физико-механических свойств требует и определенных представлений о их формировании и изменении на основе физики процесса деформационного упрочнения, под которым и понимается наклеп. Плоскость физического рассмотрения явления наклепа основана прежде всего на положениях теории дислокаций, используя которую как «инструмент» исследования различными авторами были решены определенные задачи в разных областях: физические аспекты обеспечения усталостной прочности деталей (А. В. Тотай); дислокационная модель фреттинг-усталости (В. Д. Кривчик); высокопрочные и сверхпрочные состояния металлов и сплавов (В. И. Бутенко); процессы обработки металлов давлением (В. М. Грешнов); физическая сущность износа режущего инструмента (Ю. Г. Кабалдин, Ф. Я. Якубов). Наличие дислокаций в кристаллической структуре материала проявляется через увеличение внутренней энергии системы, которую называют запасенной, скрытой, поглощенной, латентной энергией деформации. Данная энергия согласно исследований различных ученых составляет около 0,5...3 % от работы резания, тем не менее, именно эта часть энергии, вносящая изменения в энергию межатомных связей деформируемого материала, ответственна за изменение свойств контактных слоев стружки, детали и инструмента.

Внимание к этой энергии отражено в работах В. И. Бутенко В. С. Ивановой, Ю. Г. Кабалдина, В. К. Старкова, А. Г. Суслова, Ф. Я. Якубова и др., которые присваивают скрытой энергии деформации статус комплексного показателя качества поверхностного слоя и отмечают, что она лучше коррелирует с эксплуатационными свойствами, чем ее дифференцированные показатели: шероховатость, наклеп и остаточные напряжения. Этот статус и объясняет пристальное внимание к данной энергии различных научных школ, которые на её основе предлагают энергетические критерии оптимизации операций механической обработки. В результате анализа существующих исследований ощущается необходимость поиска общих закономерностей изменения скрытой энергии деформации в зависимости от различных факторов.

*Вторая глава* посвящена разработке основных положений энергетической оценки состояния и свойств поверхностного слоя материалов при их пластической деформации на основании обобщения существующих и собственных исследований. Показаны зависимости скрытой энергии деформации от различных факторов, таких как степень пластической деформации, температура де-

формации и ее близость к температуре плавления (гомологическая температура), физико-механические свойства и для определенного типа кристаллической решетки. Обнаружено, что доля скрытой энергии в общей работе деформации для всех металлов характеризуется определенной стадийностью:

– при малых степенях деформации (1...15 %) в материале накапливается около 30...80 % затраченной энергии;

– при степенях деформации выше 15 % доля скрытой энергии деформации практически для всех рассмотренных в данной работе материалов составляет 7...12 %;

– при больших степенях деформации (для меди это порядка 100 %) наблюдается понижение доли скрытой энергии в общей работе деформации, что связано с особенностями различных стадий деформационного упрочнения материалов.

Изменение напряжения течения в процессе деформации металлов, как известно, происходит с определенной стадийностью. Рассмотрение соответствия стадийностей кривых упрочнения кривым доли скрытой энергии в общей работе деформации показало, что в основе появления, продолжительности и смены стадий указанных кривых лежит единая физическая причина: поведение и плотность дислокаций.

На основе анализа дислокационных теорий деформационного упрочнения, разработана и экспериментально обоснована математическая модель расчета скрытой энергии деформации  $W$  (Дж/м<sup>3</sup>) по параметрам кривой деформационного течения материала. Данная модель основывается на следующей зависимости

$$W = \frac{Q}{\alpha^2 G} (\sigma - \sigma_{0.2})^2, \quad (1)$$

где  $\sigma$  – напряжение, необходимое для перемещения подвижных дислокаций, т. е. осуществления пластической деформации, Па;  $\sigma_{0.2}$  – условный предел текучести материала, Па;  $\alpha$  – параметр междислокационного взаимодействия;  $G$  – модуль сдвига материала, Па;  $Q$  – численный коэффициент,  $Q = 0,5...1$ .

Успех расчета по зависимости (1) зависит от знания коэффициента  $\alpha$ , который, как показывают исследования, изменяется в широких пределах, что не позволяет осуществить даже приблизительный выбор этого коэффициента для конкретного материала. Была решена задача расчетного определения данного коэффициента и решение это основывается на уже выявленных закономерностях и созданной математической модели, которые позволили сформулировать предположение или гипотезу о едином физическом механизме поглощения и диссипации энергии пластической деформации, в соответствии с которой от-

ношение скрытой энергии деформации материала (энергии дефектов кристаллического строения) к энергии затраченной на деформацию (на образование данных дефектов), является постоянной величиной для второй стадии пластической деформации материалов и составляет 10 % от затраченной энергии. Данная гипотеза предлагается для материалов с ОЦК и ГЦК кристаллическими решетками.

Возможность расчета параметра  $\alpha$  и соответственно скрытой энергии деформации позволили существенно расширить спектр исследованных материалов и выявить новые зависимости скрытой энергии от гомологической температуры (рис. 1) и от предела прочности различных групп обрабатываемых материалов (рис. 2). Исследование влияния температуры деформации на скрытую энергию показало, что последняя определяется не абсолютным уровнем температуры, а гомологической температурой. Выяснено, что с ростом гомологической температуры уровень скрытой энергии деформации уменьшается при прочих равных условиях. Рассмотрение гомологической температурной зависимости поглощенной энергии при различных степенях деформации выявило её экспоненциальный характер (рис. 1), описываемый следующим уравнением

$$W = 5,7 \cdot \varepsilon \cdot \exp\left(\frac{2 \cdot T_{пл}}{R \cdot T}\right), \quad (2)$$

где  $W$  – скрытая энергия деформации, МДж/м<sup>3</sup>;  $\varepsilon$  – степень деформации;  $T_{пл}$  – температура плавления, К;  $T$  – абсолютная температура, К;  $R$  – универсальная газовая постоянная,  $R = 8,314$  Дж/(К·моль).

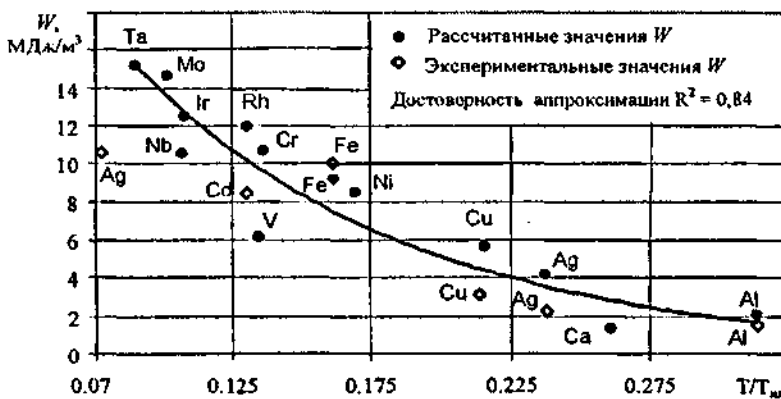


Рис. 1. Изменение поглощенной энергии деформации при увеличении гомологической температуры  $T/T_{пл}$  при  $\varepsilon = 20\%$

Зависимость (2) демонстрирует линейный характер взаимосвязи скрытой энергии с ростом степени деформации, что подтверждается теоретическими исследованиями различных авторов.

Машиностроительные стали и сплавы имеют сложную структуру, непосредственно влияющую на их способность поглощать энергию при пластической деформации. Согласно проведенных исследований она тем больше, чем



больших усилий требует материал для своей деформации. Данный вывод справедлив как для анализа скрытой энергии деформации различных сталей и сплавов, так и для чистых металлов, причем наблюдается линейная зависимость скрытой энергии деформации металлов от их пределов прочности (рис. 2).

В результате статистической обработки данных скрытой энергии деформации для различных степеней пластической деформации предложена линейная аппроксимация рассматриваемой энергии от предела прочности  $\sigma_B$  (МПа) материала и степени пластической деформации следующего вида

$$W = 0.12 \cdot \varepsilon \cdot \sigma_B \quad (3)$$

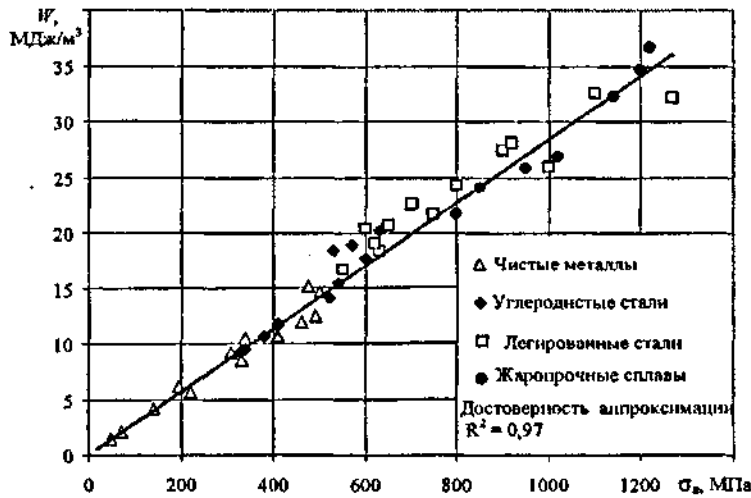


Рис. 2. Зависимость скрытой энергии  $W$  от предела прочности  $\sigma_B$  для различных материалов при  $\varepsilon = 20\%$

Подтверждению гипотезы о едином физическом механизме поглощения и диссипации энергии пластической деформации посвящены *третья* и *четвертая* главы. Для всестороннего рассмотрения высказанных предположений были выбраны принципиально разные процессы, отличающиеся широким диапазоном сил и условий воздействия на материал, а также различной реакцией материала на это воздействие: вдавливание шарового индентора в полупространство и шлифование (табл. 1).

Таблица 1

Параметры процессов воздействия

Процесс	Параметры внешнего воздействия		Отклик металла на внешнее воздействие	
	Сила деформирования, Н	Скорость приложения силы, м/с	Тепловыделение в процессе воздействия	Градиент наклепа, Па/м
Вдавливание шарового индентора	15000	$10^{-4}$	отсутствует	0,04...0,6
Шлифование	40...500	27	Большое тепловыделение	13,8...185,7

В главе 3 представлены экспериментальные исследования, посвященные способности материалов накапливать энергию при различных процессах механической обработки, и описаны материалы, методы и методики проведения экспериментальных исследований. В качестве исследуемых были взяты представители различных групп материалов: медь М1, углеродистая конструкционная сталь Ст3, углеродистая инструментальная сталь У7, легированные стали Х13М и 12Х2Н4А, быстрорежущая сталь Р9К5, жаропрочный сплав на никелевой основе ХН77ТЮР и титановый сплав ВТЗ-1.

Для экспериментальных исследований влияния способов воздействия на материал применялись стандартные методы и методики измерения параметров поверхностного слоя материалов. Кроме того, использован оригинальный метод определения степени упрочнения на различной глубине от поверхности, разработанный в диссертации, в основе которого лежит однозначная связь глубины погружения индентора и диагонали отпечатка. По сравнению с существующими, разработанный метод лишен некоторых недостатков: трудоемкой подготовки рабочей поверхности («косой срез», использование химических травителей), невозможности проведения измерений непосредственно на изделии.

В четвертой главе анализируются результаты экспериментальных исследований скрытой энергии деформации в поверхностных слоях исследуемых материалов при выбранных процессах воздействия. Показано, что доля скрытой энергии в общей работе деформации при вдавливании шарового индентора для исследованных металлов и сплавов, обладающих кубической кристаллической решеткой, укладывается в возможный диапазон значений 7...12 % согласно высказанной гипотезе (табл. 2).

Таблица 2

Результаты вдавливания шарового индентора в поверхность материалов

Материал	Скрытая энергия деформации $W$ , Дж	Общая энергия, затраченная на вдавливание $A_p$ , Дж	Отношение $\frac{W}{A_p} \cdot 100$ , %
Сu	0,312	4,707	6,6
Ст3	0,099	0,914	10,8
У7	0,057	0,835	6,8
ХН77ТЮР	0,027	0,765	5,3
ВТЗ-1	0,007	0,364	1,9

Отклонение от общей тенденции титанового сплава ВТЗ-1 объясняется его гексагональной кристаллической решеткой, для которой характерно малое число плоскостей скольжения по сравнению материалами, обладающими кубической решеткой, что также подтверждает выдвинутую гипотезу.

Анализ результатов экспериментальных исследований поверхностного слоя образца после шлифования показал, что с ростом глубины шлифования растет и скрытая энергия деформации. Вместе с тем, имеется зависимость этой энергии от физико-механических свойств исследуемых материалов. Исследование динамики процесса шлифования позволило увидеть, что по энергии воздействия материалы находятся в некоторых соответственных состояниях, характеризующихся их способностью сопротивляться пластической деформации и разрушению при шлифовании. Данную способность можно выразить безразмерным комплексом

$$\frac{\sigma_p}{\sigma_{0.2}} \cdot \frac{1}{\delta}, \quad (3)$$

где  $\delta$  – относительное удлинение.

Без специальных теоретических и экспериментальных исследований невозможно выделить энергию, затраченную исключительно на пластическую деформацию поверхностного слоя при шлифовании ( $A_p$ , Дж). Поэтому в качестве энергии воздействия в диссертации использовалась общая энергия шлифования  $A_{ш}$ , Дж (табл. 3).

Таблица 3

Фрагменты результатов исследований процесса шлифования

Материал	$t$ , мкм	$P_z$ , Н	$A_{ш}$ , Дж	$W$ , Дж	$U_{гр}$ , Дж/м <sup>3</sup>	$A_{пов}$ , см <sup>-2</sup>	$\frac{W}{A_{ш}}$ , %
Cu	10	110	857,0	0,078	1,15	$3,1 \times 10^{11}$	$9,05 \times 10^{-3}$
	20	150	1207	0,102	0,99	$2,5 \times 10^{11}$	$8,70 \times 10^{-3}$
	35	227	1829	0,156	1,49	$3,4 \times 10^{11}$	$8,54 \times 10^{-3}$
	50	260	2025	0,176	1,97	$5,1 \times 10^{11}$	$8,69 \times 10^{-3}$
Ст3	10	70	481	0,109	1,95	$4,2 \times 10^{11}$	$23 \times 10^{-3}$
	20	100	677	0,099	3,36	$5,8 \times 10^{11}$	$14 \times 10^{-3}$
	35	125	860	0,121	4,25	$7,7 \times 10^{11}$	$14 \times 10^{-3}$
	50	160	1100	0,163	5,18	$8,8 \times 10^{11}$	$15 \times 10^{-3}$
У7	10	45	405	0,168	6,51	$9,2 \times 10^{11}$	$41 \times 10^{-3}$
	20	55	495	0,176	10,80	$2,4 \times 10^{12}$	$36 \times 10^{-3}$
	35	110	990	0,390	23,93	$5,9 \times 10^{12}$	$39 \times 10^{-3}$
	50	150	1350	0,518	28,75	$7,2 \times 10^{12}$	$38 \times 10^{-3}$
ХН77ПОР	20	85	765	0,007	0,55	$3,7 \times 10^{10}$	$9,31 \times 10^{-4}$
	35	120	1080	0,011	1,11	$1,2 \times 10^{11}$	$10,6 \times 10^{-4}$
	50	140	1260	0,013	2,50	$5,0 \times 10^{11}$	$10,2 \times 10^{-4}$

Примечание:  $U_{гр}$  – градиент скрытой энергии деформации, Дж/м<sup>3</sup>;  $A_{пов}$  – поверхностная плотность дислокаций, см<sup>-2</sup>;  $P_z$  – тангенциальная составляющая силы резания, Н;  $t$  – глубина шлифования, мкм.

По этой причине, не стоит ожидать постоянства доли скрытой энергии деформации в общей работе шлифования при сравнении материалов между собой. И наоборот, внутри исследований, применительно к одному материалу, отношение  $W/A_m$  должно оставаться постоянным, что и можно констатировать на основе анализа выполненных исследований, а именно, то, что отношение  $W/A_m$  является величиной постоянной для конкретного материала и не зависит от режимов шлифования (табл. 3), что подтверждает положения выдвинутой гипотезы и для процесса шлифования.

Таким образом, на основании выполненных теоретических и экспериментальных исследований можно свидетельствовать о справедливости выдвинутой гипотезы о едином механизме поглощения и диссипации энергии деформации на практике различных процессов воздействия на материал (при вдавливании шарового индентора и шлифовании).

Вышесказанное позволяет рассматривать отношение скрытой энергии деформации к общей энергии деформирования в качестве энергетического критерия, характеризующего качество поверхностного слоя детали после механической обработки и дает возможность управления с помощью критерия  $W/A_m$  процессом шлифования с целью обеспечения заданных показателей качества поверхностного слоя, а именно, скрытой энергией деформации, степенью наклепа и плотностью дислокаций. Для процесса плоского шлифования критерий имеет вид

$$\frac{W}{A_m} = \frac{B \cdot W_s \cdot V_d}{P_s \cdot V_k}, \quad (4)$$

где  $B$  – ширина шлифования, м;  $W_s$  – интегральная величина скрытой энергии деформации по глубине поверхностного слоя, Дж/м<sup>2</sup>;  $V_d, V_k$  – скорости подачи и круга соответственно, м/с.

Скрытая энергии деформации  $W$  является интегральной характеристикой качества поверхностного слоя. Дополнительную информацию о интегральной характеристике  $W$  несут её дифференцированные показатели: параметры наклепа, остаточные напряжения, плотность дислокаций на поверхности металла, ориентация зерен и др. На основании теоретических предпосылок (глава 2) и экспериментальных исследований (глава 4) установлена математическая взаимосвязь скрытой энергии деформации  $W$  со степенью наклепа  $N$  и плотностью дислокаций  $\Lambda$  как на поверхности металла, так и по глубине модифицированного слоя:

$$N = \frac{\alpha \sqrt{W \cdot G}}{\sigma_{0,2}}, \quad \Lambda = \frac{W}{0,75 \cdot G \cdot b^2},$$

где  $b$  – вектор Бюргерса, м.

В пятой главе рассмотрены пути практической реализации разработанного энергетического критерия качества для оптимизации режимов плоского шлифования периферией круга по заданным величинам наклепа поверхностного слоя деталей.

Автором предложен алгоритм оптимизации режимов шлифования по заданным величинам степени наклепа поверхностного слоя деталей, при этом в качестве одной из координат исходной точки оптимизационного поиска используется минимально допустимая подача, определяемая по методике Н. С. Рыкунова. Разработанный автором алгоритм и метод профессора Н. С. Рыкунова являются взаимосвязанными составными частями комплексной методикой оптимизации режимов шлифования, предложенной в данной работе (рис. 3).

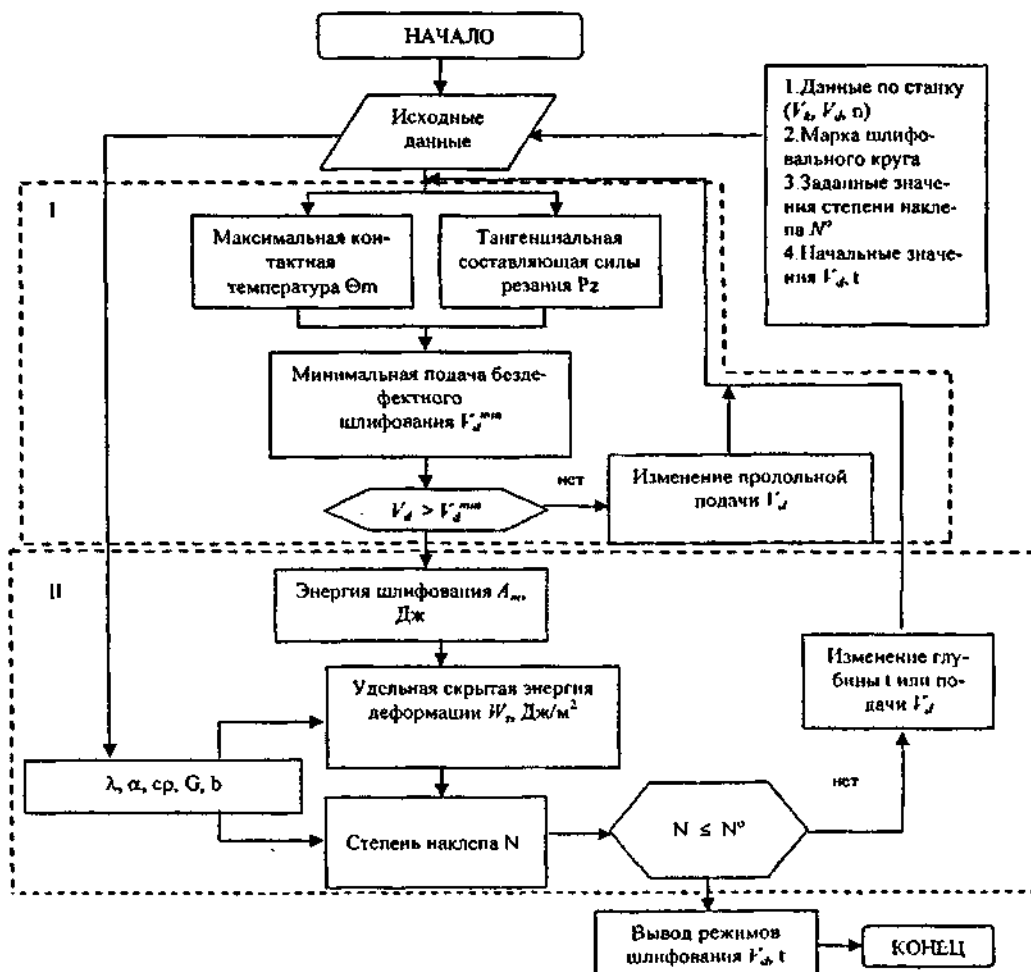


Рис. 3. Алгоритм оптимизации режимов шлифования  
 Блок I – оптимизация согласно методу Н. С. Рыкунова;  
 Блок II – оптимизация по алгоритму, предложенному в данной работе

Пример расчета режимов шлифования жаропрочного сплава на никелевой основе ХН77ТЮР для обеспечения нескольких значений степени наклепа по разработанной методике представлен в табл. 4, где показано сравнение расчетных и экспериментальных значений степени наклепа. Погрешность расчета по разработанной методике не превышает 24 %, что для практических целей является допустимым.

Таблица 4

Пример расчета режимов шлифования для сплава ХН77ТЮР по заданным величинам степени наклепа

материал	Заданная величина степени наклепа $N, \%$	Режимы шлифования: $V_r = 28$ м/с, $V_d = 19$ м/мин					Сравнение расчетных и экспериментальных значений	
		$t, \text{ мкм}$	Расчетные величины				$N_{\text{экс}}, \%$	Погрешность расчета, %
			$P_r, \text{ Н}$	$W, \text{ МДж/м}^3$	$\Lambda \times 10^{10}, \text{ см}^{-2}$	$N_p, \%$		
ХН77ТЮР	15	4	30,2	1,02	3,6	15,2	12,3	23,6
	20	12	71,3	1,81	6,5	20,2	17,0	18,8
	30	48	151,9	3,99	14,3	30,0	39,0	19,7

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1 Анализ и обобщение ранее выполненных исследований в области определения параметров наклепа показали перспективность использования и развития физических представлений поведения материала при пластической деформации применительно к механической обработке и определили направление исследований.

2 Проведенные автором теоретические и экспериментальные исследования позволили установить основные закономерности изменения скрытой энергии деформации в зависимости от степени пластической деформации, гомологической температуры, физико-механических свойств и для различных типов кристаллической решетки материалов.

3 На основе анализа дислокационных теорий деформационного упрочнения разработана и экспериментально обоснована математическая модель расчета скрытой энергии деформации по параметрам кривой деформационного течения материалов.

4 Установление общих закономерностей скрытой энергии деформации сделало возможным сформулировать гипотезу о едином физическом механизме поглощения и диссипации энергии пластической деформации, что позволило решить задачу определения индивидуального для каждого материала параметра междислокационного взаимодействия.

5 Экспериментальное подтверждение выдвинутой гипотезы для материалов разных групп и на базе различных процессов воздействия на материал позволило рассматривать долю скрытой энергии деформации в общей энергии деформирования в качестве энергетического критерия, характеризующего качество поверхностного слоя деталей машин.

6 Применение разработанного энергетического критерия к процессу плоского шлифования периферией круга показало, что доля скрытой энергии деформации в общей работе шлифования является величиной постоянной для конкретного материала и не зависит от режимов шлифования, что дает возможность управления с помощью энергетического критерия процессом шлифования для обеспечения заданных величин параметров наклепа поверхностного слоя деталей.

7 Предложенная методика оптимизации режимов плоского шлифования периферией круга на основе разработанного энергетического критерия позволяет обеспечить заданные показатели физического состояния (наклепа) поверхностного слоя, а следовательно, и требуемые эксплуатационные свойства деталей машин.

*Основные положения диссертации отражены в следующих работах.*

1 **Безьязычный, В. Ф.** Регламентация режимов шлифования с учётом субструктурных и структурно-фазовых превращений в материале поверхностного слоя [Текст] / В. Ф. Безьязычный, Б. М. Драпкин, М. А. Прокофьев, М. В. Тимофеев // Справочник. Инженерный журнал. – 2003. – № 7. – С. 48 – 54.

2 **Безьязычный, В. Ф.** Энергетическое состояние металла при вдавливании шарового индентора [Текст] / В. Ф. Безьязычный, Б. М. Драпкин, М. А. Прокофьев, М. В. Тимофеев // Инструмент и технологии. – 2003. – № 2. – С. 12 – 16.

3 **Безьязычный, В. Ф.** Оценка изменения внутренней энергии металлов по кривой течения [Текст] / В. Ф. Безьязычный, Б. М. Драпкин, М. А. Прокофьев, М. В. Тимофеев // Инструмент и технологии. – 2003. – № 11-12. – С. 95 – 100.

4 **Безьязычный, В. Ф.** Влияние шлифования на свойства поверхностных слоев стали [Текст] / В. Ф. Безьязычный, Б. М. Драпкин, М. А. Прокофьев, М. В. Тимофеев // Физика и химия обработки материалов. – 2003. – № 6. – С. 51 – 55.

5 **Безьязычный, В. Ф.** Влияние абразивно-силового воздействия на физико-механические свойства поверхности металла [Текст] / В. Ф. Безьязычный, Б. М. Драпкин, М. А. Прокофьев, М. В. Тимофеев // Справочник. Инженерный журнал. – 2004. – № 8. – С. 12 – 16.

6 Безъязычный, В. Ф. Проблемные вопросы упрочнения поверхностных слоев металлов и сплавов при пластической деформации и представление о наклепе [Текст] / В. Ф. Безъязычный, Б. М. Драпкин, М. А. Прокофьев, М. В. Тимофеев // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2005. – № 1. – С. 3 – 6.

7 Безъязычный, В. Ф. Исследование запасённой металлом энергии деформации при вдавливании шарового индентора [Текст] / В. Ф. Безъязычный, Б. М. Драпкин, М. А. Прокофьев, М. В. Тимофеев // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2005. – № 4. – Т. 71. – С. 32 – 35.

8 Безъязычный, В. Ф. Анализ взаимосвязи характеристик субструктуры, скрытой энергии деформации, затраченной работы и степени деформации материала [Текст] / В. Ф. Безъязычный, Б. М. Драпкин, М. А. Прокофьев, М. В. Тимофеев // Справочник. Инженерный журнал. – 2005. – № 5. – С. 35 – 38.

9 Безъязычный, В. Ф. Метод определения упрочнения по глубине поверхностного слоя [Текст] / В. Ф. Безъязычный, Б. М. Драпкин, М. А. Прокофьев, М. В. Тимофеев // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2005. – № 12. – Т. 95. – С. 40 – 41.

Зав. РИО М. А. Салкова

Подписано в печать 3.10.2006 г.

Формат 60×84 1/16. Уч.-изд.л. 1,0. Тираж 100. Заказ 106.

Рыбинская государственная авиационная технологическая академия им. П.А. Соловьёва (РГАТА)

Адрес редакции: 152934, г. Рыбинск, ул. Пушкина, 53

Отпечатано в множительной лаборатории РГАТА

152934, г. Рыбинск, ул. Пушкина, 53





