

М 402 654

НА ДОМ
НЕ ВРАЩАЕТСЯ

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
С С С Р

Московское ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и
ордена Трудового Красного Знамени высшее техническое училище
имени Н.Э. Баумана

На правах рукописи

ЛЮБОЛИНСКИЙ Сергей Петрович

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ И УПРАВЛЕНИЕ
ИМИ ПРИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ РЕЗАНИЕМ С ЦЕЛЬЮ
ПОВЫШЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ВЫСОКОТОЧНЫХ ДЕТАЛЕЙ

Специальность 05.02.08 - Технология машиностроения

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических наук

Москва

1983

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
С С С Р

Московское ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и
ордена Трудового Красного Знамени высшее техническое училище
имени Н.Э. Баумана

На правах рукописи

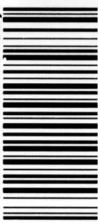
ЛЮБОЛИНСКИЙ Сергей Петрович

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ И УПРАВЛЕНИЕ
ИМИ ПРИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ РЕЗАНИЕМ С ЦЕЛЬЮ
ПОВЫШЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ВЫСОКОТОЧНЫХ ДЕТАЛЕЙ

Специальность 05.02.08 - Технология машиностроения

17402 654

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1402654

Люболинский С.П. Технологич

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических наук

Москва

1983



Работа выполнена в Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени высшем техническом училище им.Н.Э.Баумана

Научный руководитель - заслуженный деятель науки и техники РСФСР, доктор технических наук, профессор ДАЛЬСКИЙ А.М.

Официальные оппоненты: - доктор технических наук, профессор СЕМЕНОВ А.П.

- кандидат технических наук, доцент ЕРШОВ А.А.

Ведущее предприятие - указано в решении специализированного совета

Защита состоится "28" марта 1983 г. на заседании специализированного совета Ю53.15.15 МВТУ им.Н.Э.Баумана по адресу: 107005, Москва Б-5, 2-я Бауманская, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МВТУ имени Н.Э.Баумана.

Ваш отзыв на автореферат в одном экземпляре, заверенный печатью, просим направлять по указанному адресу.

Автореферат разослан "21" марта 1983 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ СОВЕТА

кандидат технических наук, доцент

МЕЩЕРЯКОВ Р.К.

Актуальность проблемы. Среди важнейших задач поставленных перед машиностроением XXVI съездом КПСС, одно из первых мест занимает задача повышения качества, надежности и долговечности выпускаемой продукции. При этом наблюдается тенденция непрерывного роста точности изделий машиностроения.

Многочисленные исследования показали, что до 80% случаев выхода из строя высокоточных машин при эксплуатации происходит в результате износа наиболее ответственных деталей в сопряжениях узлов трения. Поэтому проблема повышения износостойкости деталей имеет в настоящее время огромное значение. Ее актуальность особенно велика в прецизионном машиностроении, где допускаемые величины износа измеряются микрометрами.

Эксплуатационные свойства деталей, в частности их износостойкость, определяются, наряду с условиями работы, состоянием поверхностного слоя, его качеством, которое формируется в ходе технологического процесса изготовления. Качество поверхностного слоя деталей характеризуется геометрическими и физико-механическими параметрами. В связи с интенсификацией эксплуатационных процессов, увеличением скоростей перемещения рабочих органов, повышением температур и давлений, роль качества поверхностного слоя значительно возрастает. Возникает актуальная проблема установления связи характеристик качества поверхностного слоя с эксплуатационными свойствами деталей. При этом различные операции технологического процесса формируют по качеству различные поверхностные слои, характеризующиеся микро рельефом, напряженным состоянием, упрочнением, структурой. Отсюда следует одно из направлений повышения износостойкости - технологическое обеспечение благоприятной микрогеометрии поверхности и физико-механических свойств поверхностного слоя для определенных условий эксплуатации. В данной работе рассматриваются условия эксплуатации прецизионных пар трения скольжения.

Если в настоящее время на вопрос о влиянии микро рельефа, упрочнения поверхности на износ получен однозначный ответ, то об остаточных напряжениях этого сказать нельзя. Этим объясняется актуальность поставленной в работе цели.

Цель исследования. Изучение закономерностей влияния технологических остаточных напряжений на износ, и, на основании полученных результатов, разработка рекомендаций по повышению из-

носостойкости прецизионных деталей технологическими методами на основе управления величиной остаточных напряжений в поверхностном слое.

Методы исследования. Поставленные в работе теоретические задачи решались с применением теории упругости, теории пластичности, фрикционно усталостной теории износа. Экспериментальные исследования по определению остаточных напряжений проводились на специальной установке для электрохимического травления поверхностных слоев с одновременным замером деформации образца. Сравнение износостойкости образцов осуществлялось на машине трения СИД - 2. Применение планируемых многофакторных экспериментов позволило получить результаты в виде соответствующих математических моделей. Обработка и анализ экспериментальных данных, а так же решение теоретических задач осуществлялось с помощью ЭВМ.

Научная новизна. В результате проведенных исследований аналитически обоснована и экспериментально доказана роль технологических остаточных напряжений в процессе изнашивания высокоточных пар трения скольжения, вскрыты закономерности образования остаточных напряжений в поверхностном слое при различных методах финишной обработки деталей и получены их математические модели, разработаны технологические рекомендации по повышению износостойкости поверхностей.

Практическая ценность. На основании теоретических и экспериментальных исследований разработаны технологические рекомендации, которые позволяют:

- повысить износостойкость высокоточных деталей типа пар трения скольжения за счет формирования в поверхностном слое тангенциальных остаточных напряжений сжатия;
- выбрать финишный метод обработки при изготовлении высокоточных деталей, для которых большое значение имеет обеспечение износостойкости, таким образом, чтобы в поверхностном слое формировались благоприятные остаточные напряжения сжатия;
- использовать режимы резания с целью управления величиной остаточных напряжений в поверхности;
- использовать различные технологические факторы данного метода обработки для формирования благоприятных остаточных напряжений.

Апробация работы. Основные разделы работы докладывались

на научных семинарах кафедры "Технология металлов" МВТУ им. Н.Э.Баумана, на Всесоюзных научно - технических конференциях: "Надежность и качество машин: испытание, диагностика, прогнозирование" Москва, 1981 г., "Повышение долговечности и надежности машин и приборов" - Куйбышев, 1981 г., на научно - технической конференции Восточно - Сибирского технологического института, Улан - Удэ, 1982 г.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, списка литературы и приложений, и изложена на 201 странице, в том числе содержит 143 страницы машинописного текста, 51 рисунок, 21 таблицу, список литературы из 91 наименования и приложений на 7 страницах.

Первая глава посвящена рассмотрению современных представлений о технологических остаточных напряжениях в поверхностных слоях деталей после механической обработки резанием, причинах их возникновения и влиянии на такой эксплуатационный параметр как износостойкость. Установлено, что данные по вопросу влияния остаточных напряжений на износ носят разрозненный и противоречивый характер, что предопределило комплексное изучение этой проблемы: на первом этапе - исследование закономерностей влияния остаточных напряжений на износ и затем, на основании полученных результатов, разработка технологических мероприятий с целью формирования благоприятных остаточных напряжений в поверхностном слое детали, способствующих повышению их износостойкости.

Обзор существующих работ проведен по следующим направлениям:

- анализ работы высокоточных пар трения типа вал - втулка;
- технологические остаточные напряжения и их влияние на износостойкость;

- современные взгляды на закономерности формирования остаточных напряжений в поверхностном слое детали при механической обработке резанием;

- условия стабильности остаточных напряжений при трении.

На основании анализа литературных данных были поставлены следующие задачи исследования:

- провести экспериментальные исследования устойчивости технологических остаточных напряжений в поверхностном слое при эксплуатации прецизионных пар трения скольжения;

- обосновать выбор параметра, характеризующего величину

остаточных напряжений в поверхностном слое, так как эта величина изменяется в зависимости от глубины слоя по сложному закону, с тем чтобы посредством этого параметра производить учет влияния остаточных напряжений на износ. Для этого рассмотреть задачу контактирования отдельных микронеровностей поверхности при трении, с целью определить наиболее нагруженный слой;

- провести теоретические и экспериментальные исследования влияния величины и знака технологических остаточных напряжений на износ и определить характер и закономерности этого влияния;

- исследовать характер и закономерности влияния составляющих силы резания, как главных факторов в прецизионной финишной обработке, на процесс формирования технологических остаточных напряжений σ_r ;

- экспериментально исследовать распределение остаточных напряжений σ_r в поверхностном слое детали при различных методах обработки и выявить технологические факторы, оказывающие наибольшее влияние на их величину;

- получить эмпирические зависимости величины остаточных напряжений от наиболее существенных характеристик режимов финишных методов обработки;

- дать рекомендации по формированию благоприятных остаточных напряжений, способствующих повышению износостойкости детали на технологическом этапе ее изготовления.

Во второй главе рассмотрен ряд теоретических задач. При изготовлении высокоточных деталей различные технологические процессы, методы и режимы обработки формируют в поверхностном слое остаточные напряжения, изменяющие свою величину в зависимости от его глубины. В том слое, в котором происходит зарождение микротрещины при отделении частицы износа происходит суммирование действия непосредственно вызывающих этот процесс эксплуатационных напряжений и имеющихся в нем остаточных напряжений. Существующие в настоящее время различные взгляды на глубину залегания этого слоя / на поверхности или в глубине /, вызвали необходимость теоретического определения распределения эксплуатационных напряжений в поверхностном слое для различных условий работы высокоточных деталей при трении скольжения. Поскольку микротрещины развиваются из зон, в которых действуют максимальные эксплуатационные напряжения и происходит накопление дислокаций, в этом слое необходимо формировать благоприят-

ные остаточные напряжения, уменьшающие интенсивность разрушения, то есть изнашивания.

Контактирование при трении микронеровностей поверхности моделировалось полуплоскостью, нагруженной на участке контакта $[-a, a]$ распределенными нормальными и касательными усилиями $p(x)$ и $\tau(x)$. В результате решения контактной задачи получения зависимости для определения распределения напряжений σ_x , σ_y , τ_{yx} по глубине поверхностного слоя детали в зоне контактирования микронеровностей при трении:

$$\{\sigma_x, \sigma_y, \tau_{yx}\} = f(p(x), \rho, X, Y, a),$$

где X , Y - оси, соответственно параллельная и перпендикулярная поверхности; ρ - коэффициент трения.

Из анализа полученных результатов можно заключить, что для условий эксплуатации высокоточных деталей, работающих при трении скольжения, наиболее нагруженные слои располагаются в очень тонком поверхностном слое. Для прецизионных деталей глубина слоя в котором происходят наибольшие колебания эксплуатационных напряжений σ_x , совпадающих по направлению своего действия с направлением действия тангенциальных остаточных напряжений σ_τ , составляет 0,75...1,5 мкм. Следовательно именно в поверхностном слое толщиной несколько мкм необходимо создавать благоприятные по величине и знаку остаточные напряжения, способствующие уменьшению интенсивности изнашивания.

Для решения задачи определения влияния тангенциальных остаточных напряжений σ_τ на износостойкость высокоточных деталей использовалась фрикционно - усталостная теория износа, в которой основное уравнение имеет вид:

$$I = K_1 \alpha \sqrt{\frac{h}{z}} \cdot \frac{p_a}{p_z} \cdot \frac{1}{N},$$

где K_1 - множитель, определяемый геометрической конфигурацией и расположением по высоте единичных неровностей на поверхностях твердых тел; $\alpha = A_0/A_z$ коэффициент перекрытия / A_0 и A_z - номинальная и фактическая площадь контакта /; h - глубина внедрения; z - приведенный радиус неровностей; p_a , p_z - номинальное и фактическое давление; N - число циклов до разрушения элементарного микрообъема поверхностного слоя. В этом уравнении только величина N непосредственно зависит и связана с усталостными процессами, протекающими в поверхност-

ном слое при изнашивании, на которые остаточные напряжения оказывают свое влияние. В соответствии с основными положениями теории усталости принято, что число циклов N не зависит от формы цикла напряжений, а лишь от его амплитуды и выражается при трении зависимость:

$$N = \left(\frac{\sigma_0}{\sigma_a} \right)^{t_y},$$

где σ_0 - критическое значение напряжения при однократном нагружении, близкое к прочности материала на разрыв; σ_a - действующее амплитудное значение напряжения; t_y - параметр характеризующий фрикционную усталость материала при упругом контакте. Для прецизионных пар трения экспериментально был доказан упругий характер контакта поверхностей. Наличие в поверхностном слое остаточных напряжений приводит к изменению величины

N , а, следовательно, и интенсивности изнашивания. Действие остаточных напряжений проявляется как действие некоторой постоянной составляющей σ_m периодического цикла нагружения с амплитудой σ_a . Предельные значения напряжений действующие в этом случае в поверхностном слое

$$\begin{cases} \sigma_{\max} = \sigma_a^{\max} + \sigma_{\tau} \\ \sigma_{\min} = \sigma_a^{\min} + \sigma_{\tau} \end{cases}$$

В результате получено выражение для определения N в случае одновременного действия σ_a и σ_{τ} в виде:

$$N = \left(\frac{\sigma_0 - \sigma_{\tau}}{\sigma_a} \right)^{t_y}$$

На этом основании можно заключить, что сжимающие остаточные напряжения повышают износостойкость поверхности, и наоборот, наличие в поверхностных слоях растягивающих остаточных напряжений дает повышенный износ, тем больший, чем выше уровень остаточных напряжений растяжения. Данные выводы хорошо иллюстрирует диаграмма предельных напряжений, на которой линии ограниченных пределов выносливости при различных значениях N определяют совместное действие амплитудных напряжений σ_a , характеризующих условия эксплуатации пары трения, и тангенциальных остаточных напряжений σ_{τ} , характеризующих состояние поверхностного слоя, то есть условия предшествующей обработки.

Практика показала, что остаточные напряжения в поверхностном слое толщиной несколько мкм практически полностью формируются на окончательных операциях механической обработки. Для

этих операций при обработке высокоточных деталей большое значение имеет силовой фактор, вследствие чего была поставлена задача исследовать величину и характер распределения остаточных напряжений в зависимости от составляющих силы резания. Из анализа чистовых методов обработки установлено, что сила резания P может быть представлена единичной силой с составляющими P_y - нормальная, P_x - тангенциальная. Остаточные напряжения в поверхностном слое определяются на основании теоремы о разгрузке:

$$\sigma_{ост} = \sigma^p - \sigma^e,$$

где σ^p - истинные напряжения в поверхностном слое с учетом упруго - пластических свойств материала; σ^e - фиктивные напряжения в поверхностном слое с учетом только упругих свойств материала. σ^e определяются из решения задачи о нагружении полупространства произвольно направленной силой методами теории упругости. В результате исследования получены зависимости:

$$\left\{ \begin{matrix} \sigma_x, \sigma_y, \sigma_z \\ \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx} \end{matrix} \right\} = f(X, Y, Z, P_y, P_x, \nu, G).$$

Для определения σ^p использован переход от полученного упругого решения к упруго - пластической задаче методом переменных параметров упругости, при котором упруго - пластическая задача сводится к последовательности упругих задач в результате применения процесса последовательного приближения. Ввиду большого объема все вычисления проводятся с применением ЭВМ.

Поскольку наибольший интерес с точки зрения влияния на износостойкость проявляют тангенциальные остаточные напряжения, анализу закономерностей их формирования уделено основное внимание. Характер изменения σ^p и σ^e по глубине поверхностного слоя определяет закон изменения остаточных напряжений. При постоянном значении нормальной составляющей силы резания изменение тангенциальной силы приводит к увеличению остаточных тангенциальных напряжений σ_t только до некоторой глубины. Так глубина проникновения остаточных напряжений $\sigma_t = -100$ МПа при увеличении тангенциальной силы от 0,1 до 1,0 н остается практически постоянной и равной для стали 40Х 5,5 мкм. Для слоев лежащих глубже влияние тангенциальной силы резания незначительно и главную роль играет нормальная составляющая силы резания. Поскольку для увеличения износостойкости высокоточных деталей требуется необходимым формировать сжимающие остаточные напряже-

ния в очень тонком поверхностном слое подверженном износу, то эта цель может быть достигнута изменением режимов и метода обработки таким образом, чтобы способствовать увеличению тангенциальной составляющей силы резания.

Третья глава посвящена изложению основных методических положений проведенных экспериментальных исследований. Дано обоснование выбора экспериментальных образцов в виде колец, которые изготавлились из стали 40Х с размерами $D_{нар} = 53$ мм, $D_{вн} = 47$ мм,

$B = 13$ мм. Для определения остаточных напряжений в поверхностном слое кольцевых образцов после их механической обработки использовался метод Н.Н.Давиденкова. Определение тангенциальных остаточных напряжений проводилось на специально созданной установке, на которой в процессе постоянного электрического удаления поверхностных слоев производилось непрерывное измерение деформации кольцевого образца при помощи измерительной системы модели 212 завода "Калибр".

Одна из трудностей при исследовании влияния остаточных напряжений на износ заключается в способе формирования их различных величин в поверхностных слоях образцов. Для исключения влияния изменения микрорельефа, структуры, твердости и сохранения их неизменными для всех образцов, формирование различных величин напряжений в поверхностном слое осуществлялось за счет наведения дополнительных напряжений путем напрессовки колец на оправки с различными натягами. Величина дополнительных тангенциальных напряжений, возникающих в поверхностном слое:

$$\sigma_{\tau \text{ доп}} = \frac{E \Delta R_{вн}}{2 R_{нар}^2},$$

где Δ - натяг; $R_{вн}$, $R_{нар}$ - внутренние и наружные радиусы кольца; E - модуль упругости I рода.

Сравнение износостойкости образцов проводилось на машине трения СМЦ - 2, по схеме трения диск - колодка со смазкой. Колодки из бронзы закреплены в приспособлении, позволяющем самоустанавливаться. Для установки кольцевых образцов изменена конструкция шпиндельной оправки машины трения. Величина износа

ψ определялась весовым методом на аналитических весах с точностью до 0,1 мг. Механическая обработка образцов осуществлялась на типовом оборудовании, используемом при изготовлении высокоточных деталей.

В четвертой главе представлены результаты эксперименталь-

ных исследований, которые подтвердили теоретические выводы об закономерностях влияния остаточных напряжений σ_r на величину износа и возможности управления величиной σ_r в процессе механической обработки резанием.

Для доказательства высказанного ранее теоретического предположения об устойчивости технологических остаточных напряжений при трении скольжения высокоточных пар проделаны экспериментальные исследования, в которых кольцевые образцы из стали 40Х работали в паре с бронзовыми вкладышами со смазкой. Предварительно образцы отжигались в вакуумной печи для снятия остаточных напряжений, имевшихся в поверхностном слое после механической обработки. После отжига значение остаточных напряжений

σ_r в поверхностном слое практически равно нулю, что подтверждается измерением σ_r в нескольких контрольных образцах. Естественно заключить, что если при некоторых условиях трения в образцах, в которых отсутствовали технологические остаточные напряжения, не наводятся новые, как результат передеформирования поверхностного слоя, то при подобных условиях эксплуатации в случае наличия в поверхностном слое остаточных напряжений их изменения в процессе трения не будет происходить. Величина нагрузки при трении P бралась равной 5, 10, 20, 40, 80 кгс, что соответствует давлению $p = 0,24; 0,48; 0,96; 1,92; 3,95$ МПа. Через 10^5 оборотов образца остаточные напряжения $\sigma_r =$

-100 МПа были обнаружены только в случае максимальной нагрузки $p = 3,85$ МПа. Учитывая, что средняя нагрузка для условий работы высокоточных пар трения соответствует $p = 0,24$ МПа, можно считать доказанным, что при таких режимах эксплуатации технологические остаточные напряжения, имеющиеся в поверхностных слоях реальных деталей, сохраняются длительное время, в течение которого имеют возможность оказывать свое влияние на износ.

Для исследования влияния остаточных напряжений σ_r на износ, по ранее изложенной методике в поверхностных слоях кольцевых образцов создавались различные напряженные состояния. При заданных величинах натягов $\Delta_1 = 0$ мм; $\Delta_2 = 0,05$ мм; $\Delta_3 = 0,10$ мм; $\Delta_4 = 0,20$ мм получены дополнительные напряжения в поверхностном слое: $\sigma_{r,доп} = 0$ МПа, $\sigma_{r,доп} = 170$ МПа, $\sigma_{r,доп} = 340$ МПа, $\sigma_{r,доп} = 670$ МПа. Предварительно все образцы были шлифованы, что сформировало у поверхности остаточные

напряжения $\sigma_{\tau} = 60$ МПа . В результате в поверхностном слое кольцевых образцов действуют суммарные тангенциальные напряжения $\sigma_{\tau_1 \Sigma} = 60$ МПа , $\sigma_{\tau_2 \Sigma} = 230$ МПа , $\sigma_{\tau_3 \Sigma} = 400$ МПа , $\sigma_{\tau_4 \Sigma} = 730$ МПа .

Сравнение износостойкости образцов - колец проводилось на машине трения СМЦ - 2. Первая серия образцов испытывалась при нагрузке $p = 0,3$ МПа , вторая при $p = 1,0$ МПа . Частота вращения составляла 300 об/мин. Результаты экспериментов в виде кривых износа / рис.1 / подтвердили ранее сделанные теоретические выводы о влиянии σ_{τ} на износ. При этом влияние тангенциальных остаточных напряжений на износостойкость детали выражается практически линейной зависимостью на протяжении всего периода испытания / рис.2 /. За счет уменьшения тангенциальных остаточных напряжений с 730 МПа до 60 МПа получено увеличение износостойкости образцов в 1,5...1,7 раза.

Следовательно экспериментально доказано, что сжимающие остаточные напряжения повышают износостойкость поверхности, и, наоборот, наличие в поверхностных слоях растягивающих остаточных напряжений дает повышенный износ, тем больший, чем выше уровень остаточных напряжений растяжения. Весь технологический процесс, особенно его заключительные операции, должны быть направлены на выполнение этого условия. Проведенный анализ технологических процессов изготовления высокоточных деталей выявил ряд заключительных операций наиболее часто находящихся применение. Это тонкое точение, тонкое шлифование, суперфиниширование, полирование, виброобкатывание. У этих методов обработки экспериментально были выявлены режимы резания, оказывающие наибольшее влияние на величину σ_{τ} , в результате снижения теплового воздействия на поверхностный слой и усиления силового воздействия, что по полученным теоретическим результатам способствует росту σ_{τ} сжатия. Для этого предварительно шлифованные и отожженные в вакууме образцы, в поверхностном слое которых отсутствуют остаточные напряжения, подвергались различным методам обработки при поочередном ступенчатом изменении режимов резания. В результате были получены эпюры распределения тангенциальных остаточных напряжений σ_{τ} в поверхностном слое и установлено, что роль различных факторов режима механической обработки на заключительном этапе в процессе формирования остаточных напряжений различна. Одни факторы влияют на величину

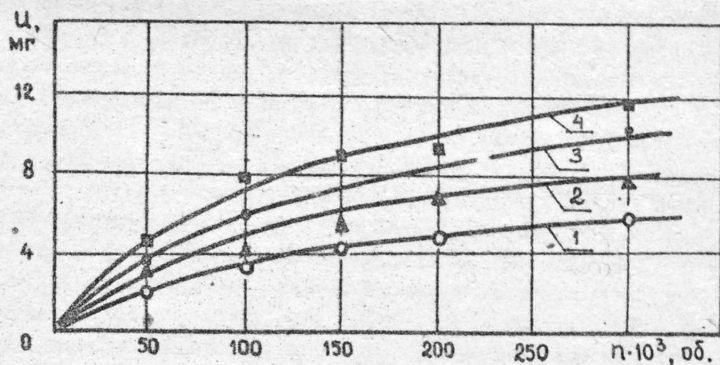
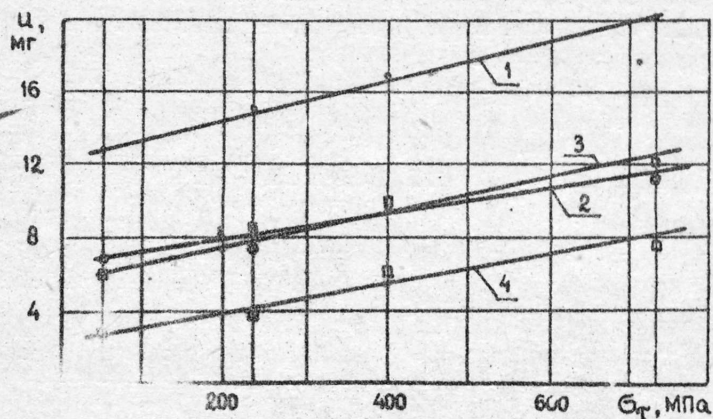


Рис. 1. Графики износа образцов с различными величинами тангенциальных напряжений в поверхностном слое при $p = 0,3$ МПа; 1 - $\sigma_\tau = 60$ МПа, 2 - 230, 3 - 400, 4 - 730 МПа



2. Зависимость износа от величины тангенциальных остаточных напряжений в поверхностном слое: 1 - $n = 3 \cdot 10^5$ об., $p = 1,0$ МПа; 2 - $n = 10^5$ об., $p = 1,0$ МПа; 3 - $n = 3 \cdot 10^5$ об., $p = 0,3$ МПа; 4 - $n = 10^5$ об., $p = 0,3$ МПа

непосредственно у поверхности, другие на глубину распространения остаточных напряжений в поверхностном слое или на их максимальное значение.

На основании анализа полученных распределений остаточных напряжений в поверхностном слое выявлены те режимы резания, изменение которых оказывает наибольшее влияние на изменение величины σ_r . При тонком точении: скорость резания - v , глубина резания - t , подача - S . При тонком шлифовании: глубина резания - t , продолжительность выхаживания - n . При суперфинишировании: скорость вращения детали - v , давление на бруски - p , продолжительность периода выхаживания - τ . При виброобкатывании: скорость вращения детали - v , давление на инструмент - p , подача - S . После чего представилось возможным используя методы многофакторного планирования экспериментов исследовать влияние этих наиболее важных параметров режима резания на величину σ_r непосредственно в приповерхностном слое и представить результаты в виде удобных для использования математических моделей. Для этого различные группы кольцевых деталей обрабатывались по типовой технологии с различными заключительными операциями. После математической обработки результатов получены следующие зависимости:

$$\text{тонкое точение} - \sigma_r = 3,8 \cdot v^{0,84} \cdot t^{-0,76} \cdot S^{0,57},$$

$$\text{тонкое шлифование} - \sigma_r = 1210 \cdot t^{0,45} \cdot n^{-0,72},$$

$$\text{суперфиниширование} - \sigma_r = -114,3 \cdot v^{0,14} \cdot p^{0,05} \cdot \tau^{0,17}$$

$$\text{виброобкатывание} - \sigma_r = -0,17 \cdot v^{0,43} \cdot p^{1,07} \cdot S^{-0,54},$$

что дало возможность разработать рекомендации для снижения остаточных напряжений растяжения или увеличения σ_r сжатия за счет изменения режимов резания в пределах допускаемых методом или точностью обработки.

В пятой главе даны практические рекомендации по формированию в поверхностном слое тангенциальных остаточных напряжений сжатия на основании правильного выбора метода обработки и корректировки режимов резания, что дало в реальных деталях повышение износостойкости до 1,3 раза. Даны технико - экономические расчеты производственного внедрения результатов исследования при финишной обработке опорных поверхностей пневмощинделей на Московском заводе скоростных прецизионных электроприводов. Годовой экономический эффект составляет 71674 руб.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Для высокоточных деталей установлена важное влияние технологических остаточных напряжений на протекание различных процессов в поверхностном слое, в том числе и на изнашивание.
2. Теоретически показана возможность повышения износостойкости высокоточных деталей, работающих при трении скольжения, за счет изменения величины тангенциальных остаточных напряжений в поверхностном слое детали.
3. Экспериментально доказано, что технологические остаточные напряжения, имеющиеся в поверхностном слое детали, как результат механической обработки, при условиях характерных для эксплуатации высокоточных деталей, сохраняются длительное время не изменяясь.
4. Теоретически и экспериментально доказано, что повышение износостойкости прецизионных деталей способствует созданию в поверхностном слое остаточных напряжений сжатия.
5. На основании теоретически разработанной диаграммы предельных состояний представлена возможность ориентировочного определения оптимальной величины технологических остаточных напряжений в поверхностном слое, при которых износостойкость будет наивысшая.
6. Теоретически получена зависимость влияния величины остаточных напряжений на количество циклов нагружения до отделения частицы износа от поверхностного слоя детали. Поскольку эта величина находится в обратнопропорциональной зависимости с величиной износа, то оказывается возможным прогнозировать изменение износа при изменении величины σ_{τ} в поверхностном слое после механической обработки.
7. Исходя из того, что для формирования сжимающих остаточных напряжений необходимо усилить силовой фактор, проведен теоретический анализ влияния сил резания на величину и характер распределения остаточных напряжений в поверхностном слое. Теоретически и экспериментально подтвержден тот факт, что силовое воздействие на поверхностные слои формирует тангенциальные остаточные напряжения сжатия. При этом установлено, что возрастание тангенциальной силы резания P_z приводит в большей степени к увеличению напряжений сжатия в тонком приповерхностном слое, чем на рост остаточных напряжений в более глубоко лежащих слоях.
8. Выявлены наиболее важные факторы режимов резания, ока-

зывающие значительное влияние на величину остаточных напряжений в поверхностном слое и на основании экспериментальных исследований финишных методов обработки рекомендовано суперфиниширование, как наиболее благоприятный метод обработки с точки зрения формирования сжимающих остаточных напряжений.

9. Полученные эмпирические зависимости величины тангенциальных остаточных напряжений в поверхностном слое от значений наиболее важных параметров режимов резания позволяют в пределах метода обработки варьированием режимов изменять в нужную сторону величину σ_{τ} .

10. На основании проведенных исследований разработаны практические рекомендации по повышению износостойкости высокоточных деталей технологическими методами в процессе изготовления.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Ляблинский С.П. Технологические остаточные напряжения как фактор управления долговечностью при износе. - Надежность и качество машин: испытание, диагностика, прогнозирование: Тез. докл. Всесоюзной конф., Москва, 1981, с. 191 - 192.

2. Ляблинский С.П. Роль остаточных напряжений в повышении долговечности высокоточных деталей при трении скольжения. - Повышение долговечности и надежности машин и приборов: Тез. докл. Всесоюзной конф., Куйбышев, 1981, с. 236 - 237.

3. Ляблинский С.П. Экспериментальное определение влияния остаточных напряжений на износостойкость. - Известия вузов. Машиностроение, 1982, № 2, с. 24 - 27.

4. Ляблинский С.П. Прибор для измерения остаточных напряжений. - Информ. листок / ЦНТИ, Улан-Удэ, № 15 - 82, 1982. - 3 с.

5. Ляблинский С.П. Формирование остаточных напряжений при отделочных методах обработки. - МВТУ им. Н.Э. Баумана, 1982, 10 с. / Деп. в НИИмаше 27 янв. 1982, № 5 мш - Д82 /.

