

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКИ

ИНСТИТУТ МАШИНОВЕДЕНИЯ НАН КР

Диссертационный совет Д 05.11.043

На правах рукописи
УДК 621.822.723/.724:620.172.21(043)

Тусупбекова Гульнара Махабатовна

**АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ НАСЛЕДСТВЕННОСТИ
ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПОДШИПНИКОВЫХ КОЛЕЦ И
РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ИХ УМЕНЬШЕНИЮ**

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

Бишкек – 2012

Работа выполнена в Казахском национальном техническом университете имени К.И. Сатпаева (КазНТУ)

Научные руководители: доктор технических наук, профессор
Серик Акимович Машеков

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Николай Сабирович Адигамаев

кандидат технических наук, доцент
Анвар Амантаевич Самсалиев

Ведущая организация: Казахстанско-Британский
технический университет
(г. Алматы, ул. Толе би,59)

Защита состоится «9 » ноября 2012 г. в 16.00 часов на заседании диссертационного совета Д.05.11.043 при Институте машиноведения Национальной академии Наук Кыргызской Республики, г. Бишкек, ул. Скрябина, 23.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института машиноведения Национальной академии наук Кыргызской Республики.

Ваши отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписью, заверенной гербовой печатью, просим направлять по адресу: 720055, г. Бишкек, ул. Скрябина, 23, Институт машиноведения НАН КР, Диссертационный совет Д 05.11.043, e-mail: imash_kg@mail.ru.

Автореферат разослан «__» _____ 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 05.11.043,
к.т.н., с.н.с.



Квитко С.И.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Технический прогресс в машиностроении во многом определяется технологией изготовления различных деталей и сборочных единиц изделий. При этом в технологическом цикле изготовления деталей доминирующая роль принадлежит обработке металлов давлением и механической обработке. Одним из направлений повышения эффективности обработки металлов давлением и механической обработки является нахождение рациональных параметров технологических процессов изготовления изделия. Поэтому важнейшей задачей машиностроения, в частности, подшипникоостроения, на современном этапе является разработка более эффективных технологических процессов изготовления деталей, обеспечивающих не только достижение высокой точности при минимуме затрат, но и сохранение первоначальных показателей точности в течение всего срока службы изделия. Одним из основных факторов, приводящих к снижению первоначальной точности деталей, является релаксация остаточных напряжений. Увеличение отклонений их формы, вызываемое релаксацией напряжений, неизбежно приводит к снижению надежности и уменьшению срока службы машин, снижению их эксплуатационных свойств.

Для повышения эффективности технологических процессов обработки необходимо иметь модель напряженно-деформированного состояния (НДС), формирующегося в результате обработки. Модель НДС должна обеспечивать возможность прогнозирования остаточных напряжений и деформаций с учетом начального напряженно-деформированного состояния, имевшегося в заготовке перед обработкой. Изменение НДС подшипниковых труб при прокатке происходит в результате упруго - пластического деформирования. Современные методы прогнозирования остаточных деформаций при упруго-пластическом деформировании базируются на основных положениях теории пластичности. Большая часть этих методов носит эмпирический характер. Поэтому в настоящее время используемые методы расчета НДС носят приближенный, полуэмпирический характер и не пригодны для точной оценки остаточного напряжения.

В связи с этим требуется проведение численного исследования НДС прокатки подшипниковых труб на основе современного подхода с использованием определяющих соотношений теории пластичности и упругости. Поэтому задачи, связанные с определением НДС прокатки подшипниковых труб при изменяющихся технологических и геометрических параметрах с использованием имитационного моделирования

процессов прокатки с помощью метода конечных элементов являются *актуальными*.

Цель и задачи исследования. Целью работы является разработка численного и эмпирического метода решения задачи по определению остаточных напряжений в подшипниковых трубах и кольцах разного диаметра и на основе этих исследований реализация новых технологических режимов обработки, обеспечивающих уменьшение остаточного напряжения.

Для достижения поставленной цели решались следующие основные задачи:

- изучение закономерностей распределения НДС и остаточного напряжения при прокатке труб на редуционном стане, при обратной нагрузке и отпуске, и за счет вариации температуры отпуска разработка усовершенствованной технологий, обеспечивающих снижение остаточного напряжения при прокатке;

- разработка методики расчета остаточного напряжения при прокатке труб на редуционном стане и на основе этой методики изучение закономерностей распределения остаточного напряжения в подшипниковых трубах;

- изучение влияния технологической наследственности обработки на формирование остаточного напряжения и за счет вариации технологических и геометрических параметров обработки разработка усовершенствованной технологии, обеспечивающей получение подшипниковых колец без остаточного напряжения.

Научная новизна работы:

- на основе полученных данных в среде Autodesk Inventor разработаны методики расчета остаточного напряжения при прокатке толстостенных труб на редуционном стане и на основе этой методики расчетным путем доказано возможность нарушения сплошности исследуемых труб по внутренней поверхности;

- методом конечных элементов получены количественные данные и установлены основные закономерности распределения НДС и остаточных напряжений при прокатке подшипниковых труб на редуционном стане;

- выявлены закономерности влияния температурных режимов отпуска на изменение остаточного напряжений в подшипниковых трубах и кольцах различного диаметра и на основе этих закономерности усовершенствована технология прокатки труб и механической обработки, обеспечивающих снижение остаточных напряжений;

- изучены влияния технологической наследственности обработки на формирование остаточного напряжения и за счет вариации техноло-

гических и геометрических параметров обработки усовершенствована технология, обеспечивающая получение подшипниковых колец без остаточного напряжения.

Практическая значимость полученных результатов.

1. Определены рациональные параметры процесса точения подшипниковых труб и разработаны научно обоснованные технологические режимы изготовления подшипниковых колец.

2. Усовершенствованы температурные режимы отпуска подшипниковых труб, способствующие получению изделия требуемой формы с минимальным количеством остаточных напряжений.

3. Опытно-промышленная проверка предложенного способа обработки подшипниковых колец, проведенной на предприятии МАССА-ГЕТ ПЛЮС, показала повышение ресурса работы подшипниковых колец.

Экономическая значимость полученных результатов. Теоретические и экспериментальные результаты работы, положенные в основу апробированных результатов исследований и рекомендаций, направлены на повышение эффективности производства и улучшения качества труб и колец. Ожидаемый экономический эффект от внедрения результатов работы в промышленности составит более 6,5 млн. тенге.

Основные положения, выносимые на защиту:

- методика расчета остаточного напряжения при прокатке толстостенных труб на редуционном стане, а также закономерности нарушения сплошности подшипниковых труб по внутренней поверхности;

- количественные данные и основные закономерности распределения НДС и остаточных напряжений при прокатке подшипниковых труб на редуционном стане;

- закономерности влияния температурных режимов отпуска на изменение остаточного напряжения в подшипниковых трубах и кольцах различного диаметра, а также усовершенствованная технология прокатки труб, обеспечивающая снижение остаточных напряжений;

- закономерности влияния технологической наследственности обработки на формирование остаточного напряжения, а также усовершенствованная технология обеспечивающая получение подшипниковых колец без остаточного напряжения.

Личный вклад соискателя в получении результатов. Основные результаты, изложенные в диссертации, получены автором лично, анализ полученных данных проведен самостоятельно с учетом имеющихся в отечественной и зарубежной литературе сведений.

Апробация результатов исследований. Материалы диссертационной работы обсуждались на 2-ой Международной научно-практической конференции – «Горное дело и металлургия в Казахстане».

Состояние и перспективы – 15-летию независимости Республики Казахстан» (Алматы, 2006 г.), на Международных научных конференциях «Наука и образование- ведущий фактор стратегии «Казахстан-2030» (Караганда, 2007 г., 2008 г.)

Публикации. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 11 научных трудах, подана заявка на инновационный патент Республики Казахстан.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка использованных источников, включающего 102 наименования, и приложения. Объем диссертации – 163 страницы машинописного текста, 56 формул, 5 таблиц, 59 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследований, отражены научная новизна и практическая ценность работы.

В первой главе доказывається, что важнейшей задачей машиностроения, в частности, подшипникостроения, на современном этапе является разработка более эффективных технологических процессов изготовления деталей, обеспечивающих не только достижение высокой точности при минимуме затрат, но и сохранение первоначальных показателей точности в течение всего срока службы изделия. В данной главе показано, что одним из основных факторов, приводящих к снижению первоначальной точности деталей, является релаксация остаточных напряжений. Рассмотрены основные направления совершенствования прокатки подшипниковых труб и механической обработки подшипниковых колец. Показано, что существующая технология и известные способы стабилизации геометрических показателей малоэффективны, так как их использование на практике приводит к снижению точности геометрических размеров и формы подшипниковых колец.

Во второй главе исследовано напряженно-деформированное состояние (НДС) подшипниковых труб при прокатке на редуционном стане. Методика расчета реализована с использованием программы конечно-элементного (КЭ) анализа Autodesk Inventor. Система компьютерного моделирования Autodesk Inventor позволяет исследовать кинематику, динамику механизмов с возможностью расчета напряженно-деформированного состояния, как конструкции, так и деформируемой заготовки. Сборочная трехмерная геометрическая модель клеток редуционного стана, была построена в САД программе

Inventor. Для возможности автоматической коррекции геометрии модели инструмента, был использован метод параметризации геометрических размеров конструкции.

Задача получения труб моделировалась в трехмерной среде с разбиением трубы на 4-х узловые элементы (СТЕТРА). Соприкасающиеся поверхности валка и труб (контакт типа «rigid-to-flexible») разбивали также на соответствующие элементы. Контакт между ними учитывает трение. Материал заготовки принимали изотропным упругопластическим с нелинейным упрочнением (BISO). Весь процесс деформирования разбивали на достаточно малые подшаги. Шаг задачи определяет соответствующий переход. Решение соответствующей нелинейной системы уравнений осуществляли при помощи полного метода Ньютона-Рафсона.

Для расчета НДС использовали техническую характеристику редуционного стана. Для прокатки труб $\varnothing 110$ мм на непрерывном редуционном стане использовали трубу толщиной $s_0 = 8$ мм.

С целью снижения вычислительных затрат и уменьшения размерности конечно-элементной модели, необходимо уменьшить длину прокатываемых труб на величину приблизительно $(2,0 \div 2,2)D$ мм, где D – диаметр прокатываемых труб. Данное упрощение позволит моделировать процесс прокатки на уровне установившегося режима без больших вычислительных затрат. Время расчета процесса прокатки в каждой клетке составило 6–8 мин на компьютере Pentium Duo с тактовой частотой 3,4 ГГц и оперативной памятью 2 Гбайта.

В качестве материала заготовки был выбран свинцовосурьмянистый сплав с температурным диапазоном деформирования 22 – 300 °С и механическими свойствами: модуль упругости 14 ГПа, коэффициент Пуансона 0,3 и плотность 11300 кг/м³. Для моделирования пластичности материала заготовки была выбрана упругопластическая модель Джонсона-Кука. Контакт между валком и прокатываемой трубой смоделирован трением по Кулону, коэффициент трения был принят 0,3.

Процесс прокатки в редуционном стане можно разделить условно на двадцать две стадии, так как прокатка производится на двадцатидвухклетевом редуционном стане. Поэтому для наглядности отображения результатов расчета были взяты данные для конечного обжатия каждой стадии деформирования.

На основе полученных результатов численного моделирования установлено, что:

- при прокатке на редуционном стане в трубах действуют напряжения σ_{xx} , σ_{yy} , σ_{zz} и σ_{xz} ;
- при прокатке труб во всех клетках редуционного стана компоненты

тензора напряжений локализируются в отдельных участках толстостенной трубы;

- в некоторых участках очага деформации прокатываемых в редуционном стане труб возникают растягивающие, а в других сжимающие компоненты тензора напряжений;
- после прокатки на редуционном стане упругие сжимающие смещения возникают на внешней поверхности, а упругие растягивающие смещения – на внутренней поверхности труб;
- при прокатке труб максимальные по величине растягивающие и сжимающие напряжения σ_{xx} , σ_{yy} , σ_{zz} и σ_{xz} сосредотачиваются в большинстве случаев на внешней поверхности толстостенной трубы.

Во второй главе произведен расчет остаточного напряжения при прокатке труб на редуционном стане. Для расчета остаточных напряжений использована теорема о разгрузке. Теорема предполагает, что при разгрузке не возникают вторичные деформации, и она осуществляется только упруго.

Следуя теореме и применяя программу Autodesk Inventor, исследовано напряженно-деформированное состояние труб при нагрузке обратной, чем при прокатке на редуционном стане. На основе полученных результатов численного моделирования установлено, что максимальные по величине растягивающие и сжимающие напряжения σ_{xx} , σ_{yy} , σ_{zz} и σ_{xz} сосредотачиваются в большинстве случаев на внутренней поверхности толстостенной трубы.

Используя теорему о разгрузке, остаточные напряжения рассчитали как алгебраическую сумму напряжений пластической деформации и напряжений упругой разгрузки. Результаты расчета показали, что:

- максимальные по величине сжимающие и растягивающие напряжения σ_{xx} , σ_{yy} , σ_{zz} и σ_{xz} сосредотачиваются или на внешней поверхности, или на внутренней поверхности прокатываемой трубы;
- компоненты тензора напряжения σ_{xx} , σ_{yy} и σ_{zz} располагающиеся на внутренней поверхности труб во многих случаях являются по величине большим, чем компоненты тензора напряжения, располагающиеся на внешней поверхности прокатываемых труб.

На основе этих расчетов было установлено, что причиной возникновения трещин на внутренней поверхности толстостенных труб после безоправочного редуцирования является появление по сечению труб значительных по величине растягивающих и сжимающих остаточных напряжений σ_{xx} , σ_{yy} , σ_{zz} и σ_{xz} . Анализ показал, что прокатка толстостенных труб на редуционном стане, как одна из завершающих операций производства толстостенных труб для подшипников, обладает

существенными недостатками, предопределяющими возникновение дефектов на внутренней или внешней поверхности труб. Это обстоятельство послужило основанием предложить применение в технологии прокатки отпуску с рациональной температурой нагрева после прокатки на редуционном стане.

В третьей главе исследовано влияние отпуску на остаточные напряжения. Для этого вырезали образцы из труб с толщиной стенки 6 мм с различными диаметрами: 60,3, 89, 127 и 168 мм из трубной стали группы ШХ15, предназначенной для изготовления шарикоподшипниковых колец. Образцы прямоугольного сечения 5×6 мм и длиной 120 мм были вырезаны из труб вдоль ее оси. Поверхность образцов была отшлифована до шероховатости $R_a = 0,32$ мкм. Для того чтобы избежать влияние механической обработки на внутренние напряжения, стравливался поверхностный слой толщиной примерно 15 мкм путем электрополировки, используя раствор хромового ангидрида в ортофосфорной кислоте.

Варьирование уровня внутренних напряжений в образцах производилось с помощью двухчасового отпуску при температурах 150, 300, 450, и 600 °С. Выбор верхней температуры отпуску был связан с тем, что при более высокой температуре происходит сильное окисление, образование на поверхности образца раковин и активация процессов рекристаллизации, в том числе рост размера зерна. Образцы после отпуску охлаждались вместе с печью и затем вновь подвергались электрополировке для удаления окисленного слоя. Исследовали также образцы и в исходном состоянии, без отпуску.

Рентгеноструктурный анализ производился на дифрактометре X.Pert MPD PRO (PANalytical) с использованием K_{α} излучения хромового анода. Используя рентгеновский дифрактометр, исследовали четыре зоны, расположенные под 90° относительно друг друга на внешней поверхности заготовок. Анализ напряжений осуществлялся по линии (211) α -фазы (двойной угол дифракции $2\theta \approx 158^\circ$). Толщина анализируемого слоя, дающая 90% интенсивность пучка. Угол наклона φ принимался равным 0° , 10° , 20° , 30° , 40° . Образцы на рентгеновском дифрактометре устанавливали таким образом, чтобы определить макронапряжения в тангенциальном направлении образца.

На основе проведенных экспериментов рассчитали величину макронапряжений методом $\sin^2 \varphi$. Анализируя полученные результаты, сделан вывод, что в тангенциальном направлении у заготовок $\varnothing 60,3$, $\varnothing 89$, $\varnothing 127$, $\varnothing 168$ наблюдаются остаточные напряжения разного знака, что может привести при их дальнейшей обработке к овализации; с

увеличением диаметра труб, прокатанных на редуционном стане, увеличиваются растягивающие остаточные напряжения в тангенциальном направлении во всех зонах заготовки, а именно с увеличением температуры отпуска остаточные напряжения уменьшаются.

На основе экспериментально полученных данных сделано заключение, что для снижения остаточного напряжения шарикоподшипниковых труб, прокатанных на редуционном стане, необходимо применить отпуск при температуре $600...650^{\circ}\text{C}$.

В четвертой главе, используя известный способ определения деформации разрезанного кольца при послойном удалении металла, определены остаточные напряжения в кольцах, обработанных окончательными операциями механической обработки. При использовании данного метода удаление слоев производили путем электрохимического травления в известной установке для исследования остаточных деформаций.

Окружные остаточные напряжения исследованы для трубы длиной 100 мм с наружным Ø 60,3 мм и внутренним Ø 54,3 мм из сталей ШХ15 с использованием статистического метода планирования эксперимента. Из этих труб разрезали кольца шириной $10 \pm 0,2$ мм, после чего кольца подвергали нормализации с целью снятия различных напряжений от предварительной обработки. После термообработки кольца подвергали точению на исследуемых режимах, и на них делали разрезы на электроэрозионном станке для определения параметров остаточных напряжений.

Образцы типа колец были обработаны на станке ФТ-11 резцом из твердого сплава Т15К6. Выбрали следующие величины параметров резания: глубина резания $t = 1,0$ мм; скорости резания $v = (31; 48; 61)$ м/мин.; подача $S = (0,12; 0,29; 0,48)$ мм/об.; передний угол резца $\gamma = (-5^{\circ}; 0^{\circ}; 5^{\circ})$; задний угол резца $\alpha = 9^{\circ}$; главный угол в плане $\varphi = 45^{\circ}$; вспомогательный угол в плане $\varphi_1 = 12^{\circ}$; радиус при вершине резца $r = 1$ мм.

Для исследования влияния температурного или силового полей или одновременного их воздействия на параметры остаточных напряжений определили значения температуры и сил резания при обработке образцов на принятых режимах резания соответствующей операции.

Микротвердость поверхностных слоев исследовалось методом вдавливания алмазной пирамиды на приборе ПМТ-3М.

Результаты экспериментов показали, что:

– максимальные величины остаточных напряжений растяжения находятся на глубине 30...45 мкм;

- распределения остаточных напряжений по глубине для стали ШХ15 определяется значениями скорости резания, подачи и угла резания;
- изменение скорости резания от $V = 31$ м/мин до $V = 48$ м/мин, при $s = 0,12$ мм/об; $t = 1,0$ мм и $\gamma = 5^\circ$ вызывает увеличение максимальных остаточных напряжений растяжения в поверхностном слое у стали ШХ15 от 300 до 430 МПа;
- глубина распространения остаточных напряжений находится в пределах 150...180 мкм;
- величина остаточных напряжений в поверхностном слое по мере углубления уменьшается и на глубине 120...130 мкм и изменяет свой знак; изменение подачи от $s = 0,29$ мм/об до $s = 0,48$ мм/об при скорости резания $V = 61$ м/мин, $t = 1,0$ мм и $\gamma = 5^\circ$ вызывает увеличение величины остаточных напряжений растяжения в поверхностном слое у стали ШХ15 от 450 до 500 МПа;
- увеличение подачи не только вызывает повышение значения остаточных напряжений, но и увеличивает глубину изменения их знака; изменение знака остаточных напряжений происходит на глубине 120 и 135 мкм, соответственно при подачах $s = 0,29$ мм/об и $s = 0,48$ мм/об;
- уменьшение переднего угла вызывает уменьшение величины остаточных напряжений, при этом максимальная величина остаточных напряжений изменяется у стали ШХ15 от 310 до 450 МПа;
- до скорости $V = 64$ м/мин силы резания возрастают, достигая значения 1300 Н;
- по мере увеличения скорости резания до $V = 200$ м/мин, величины составляющих сил резания уменьшаются, и при скорости резания $V \geq 250$ м/мин величина составляющих сил резания практически не изменяется;
- увеличение составляющих сил резания при скорости резания $V \leq 64$ м/мин связано с недостаточным увеличением пластичности обработанного материала при этих скоростях резания и температуры резания;
- рост работы пластической деформации вызывает увеличение составляющих силы резания;
- дальнейшее увеличение скорости резания сопровождается повышением температуры резания, достаточной для увеличения пластичности материала и снижения коэффициента трения сходящей стружки по передней поверхности инструмента, все это способствует снижению составляющих сил резания при $v \geq 64$ м/мин;
- на величину составляющих силы резания значительное влияние оказывает изменение подачи. С увеличением подачи пропорционально

увеличивается толщина срезаемого слоя, что вызывает рост составляющих сил резания.

Четвертой главе показано, что по результатам эксперимента построен график зависимости среднетемпературной температуры в зоне резания от скорости резания и подачи что температура резания с увеличением скорости резания нарастает неравномерно в области исследуемых величин $\theta = 700 \dots 1000$ °С. Несколько меньшее влияние на температуру резания оказывает подача. Сопоставление кривых изменения температуры резания и максимальных значений остаточных напряжений в поверхностном слое деталей показывает аналогичность их характера.

Показано, что доминирующее влияние на образование растягивающих остаточных напряжений оказывает температура резания, т.е. скорость резания. Это влияние возможно в том случае, когда напряжения, вызванные в металле температурой резания, больше или равны пределу текучести, т.е. при наличии термопластических деформаций.

Температура резания при исследуемых режимах резания для стали ШХ15 находилась в пределах 600...800 °С. Поэтому на формирование остаточных напряжений в поверхностном слое этой стали оказывает существенное влияние термопластическая деформация от температуры резания.

Известно, что параметры остаточных напряжений определяются и фазовыми превращениями в поверхностном слое металла под действием температуры резания. Микроструктурное исследование показало, что при точении подшлифованных сталей в состоянии нормализации в поверхностном слое при исследуемых режимах резания структурное превращение не наблюдается. Однако наблюдалась вытянутость зерен поверхностного слоя металла в направлении скорости резания.

Измерение микротвердости, которое производили после чистового и тонкого точения, показало, что чистовое точение не приводит к значительным изменениям микротвердости. Тонкое точение привело еще к меньшим изменениям микротвердости поверхности.

Далее изучалось влияние скорости резания, подачи на шероховатость поверхности при точении образцов из стали ШХ15. Анализ полученных данных позволил заключить, что в достаточно широком диапазоне скоростей резания шероховатость поверхности изменяется незначительно. Так, например, при скорости резания $V = 64$ м/мин и подаче $S = 0,29$ мм/об шероховатость поверхности $R_a = 2,1$ мкм, а при скорости резания $V = 230$ м/мин и той же подаче $R_a = 1,9$ мкм.

Значительное влияние на шероховатость обработанной поверхности оказывает величина подачи. Влияние подачи проявляется путем действия на ее высоту поверхностных неровностей и условий протека-

ния процесса пластической деформации металла в зоне резания. Анализ зависимости $R_a = f(s)$ показывает, что с увеличением подачи s от 0,1 до 0,45 мм/об шероховатость обработанной поверхности R_a возрастает от 1,30 до 2,25 мкм, что соответствует шестому классу шероховатости по ГОСТ 2789-80.

Отмечено, что при чистовом точении в поверхностном слое металла формируются остаточные напряжения растяжения, которые на определенной глубине переходят в напряжения сжатия. Максимальная величина остаточных напряжений растяжения находится на глубине 30...45 мкм от поверхности и распространяется на глубину 120...130 мкм в зависимости от режимов резания. Максимальная величина напряжения сжатия находится на глубине 120...130 мкм. Учитывая изложенное, на данном этапе работы исследовали влияние скорости резания, подачи, глубины резания и переднего угла резца на остаточные напряжения и шероховатость обработанной поверхности при тонком точении.

При тонком точении глубина резания определяется, исходя из глубины распространения остаточных напряжений при чистовом точении и залегания максимальных величин напряжений сжатия, т.е. точение производится соответственно глубиной резания $t = 0,3$ мм и $t = 0,1$ мм. Точение производится резцами с передними углами $\gamma = -5^\circ$ и $\gamma = 0^\circ$. Остальные значения геометрических параметров те же, что и при чистовом точении.

Из полученных результатов следует, что:

- при тонком точении в интервале скоростей резания $V = 200...320$ м/мин при $s = 0,12$ мм/об, $t = 0,3$ мм резцом с $\gamma = 0^\circ$ в поверхностном слое стали ШХ15 формируются остаточные напряжения растяжения, которые на глубине 80...100 мкм переходят в напряжения сжатия;
- изменение скорости резания в большую сторону вызывает увеличение максимальных величин остаточных напряжений в поверхностном слое в 1,2...1,3 раза);
- при точении резцом с передним углом $\gamma = -5^\circ$ в интервале скоростей резания $V = 160...320$ м/мин с подачей $s = 0,097$ мм/об и 0,1 мм/об в поверхностном слое стали ШХ15 формируются остаточные напряжения растяжения величиной 224...395 МПа;
- при обработке резцом с передним углом $\gamma = -5^\circ$ величина остаточных напряжений растяжений в 1,5...2 раза меньше, чем при точении резцом с $\gamma = 0^\circ$;
- глубина изменения знака остаточных напряжений находится в пределах 100...110 мкм; при точении резцом с передним углом $\gamma = 0^\circ$ со скоростью резания $V = 200$ м/мин, $t = 0,3$ мм изменение подачи $s = 0,07$

мм/об до $s = 0,14$ мм/об формирует в поверхностном слое остаточные напряжения растяжения;

- при точении с глубиной резания $t = 0,1$ мм и $\gamma = -5^\circ$ при постоянстве других факторов величина напряжения растяжения уменьшается в 1,6...4,0 раза; изменение знака остаточных напряжений происходит на глубине 80...100 мкм.

Анализ экспериментальных данных показывает, что на максимальные величины остаточных напряжений растяжения и глубину изменения знака напряжений оказывает влияние скорость резания, подача и передний угол резца. Изменение глубины резания при постоянстве других факторов не оказывает существенного влияния на параметры остаточных напряжений.

Характер формирования остаточных напряжений при тонком точении объясняется весьма напряженным температурным полем. Оно характеризуется высокими температурными их градиентами. Изменение же силы резания при этом незначительно.

Известно, что качество и точность рабочих поверхностей готовой детали машин формируется на протяжении всего технологического процесса механической обработки. При этом отдельные свойства и характеристики детали переходят от операции к операции. Они как бы «наследуются» от предыдущих операций, т.е. можно сказать, что при механической обработке детали имеет место технологическая наследственность. Поэтому в каждом конкретном случае, необходимо установить объективные закономерности формирования остаточных напряжений в поверхностном слое готовой детали, учитывая действия технологического наследования.

Далее рассматриваются результаты экспериментов по определению остаточных напряжений, формируемых в поверхностном слое образцов после выполнения комплекса операций – чистовое и тонкое точение. При этом режимы резания этих операций соответствуют тем, что при их раздельном исследовании, но в различных сочетаниях. Это позволит установить степень пооперационного взаимодействия полей остаточных напряжений в поверхностном слое деталей в зависимости от сочетания методов и изменения режимов обработки отдельных операций всего технологического процесса.

Результаты исследования показали, что:

- в поверхностном слое окончательно обработанных образцов, после проведения комплекса операций, формируются остаточные напряжения растяжения;

- для стали ШХ15 в зависимости от сочетаний режимов резания комплекса операций максимальные величины этих напряжений изменяются в пределах 192...410 МПа;
- при раздельном проведении операции тонкого точения в поверхностном слое стали ШХ15 при тех же режимах резания формируются остаточные напряжения растяжения;
- максимальная величина этих напряжений в 1,2...1,4 раза больше, чем после проведения комплекса операций;
- характер распределения остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя металла после проведения комплекса операций идентичен с характером распределения остаточных напряжений при раздельном проведении этих операций;
- при тонком точении, особенно при глубине резания $t = 0,3$ мм, после чистового точения максимальные значения остаточных напряжений растяжений значительно меньше, чем при раздельном проведении тонкого точения.

Уменьшение максимальных значений остаточных напряжений растяжений объясняется тем, что на глубине 40...50 мкм при чистовом точении остаточные напряжения сжатия достигают своих максимальных значений. Эти значения напряжений суммируются с остаточными напряжениями растяжения, формируемыми в поверхностном слое режимами резания тонкого точения. Поэтому значения остаточных напряжений в поверхностном слое у стали ШХ15 после чистового и тонкого точения определяется пооперационным взаимодействием полей остаточных напряжений этих операций.

Результующий характер распределения остаточных напряжений в поверхностном слое металла после проведения чистового и тонкого точения отличается не только величиной максимальных значений остаточных напряжений, но и уменьшением глубины распространения остаточных напряжений растяжения (40 - 60 мкм).

Таким образом, проведенные исследования подтверждают проявление технологической наследственности при механической обработке деталей машин по остаточным напряжениям поверхностного слоя. Степень технологической наследственности определяется сочетанием режимов резания отдельных операций всего комплекса и величиной снимаемого припуска на отдельных операциях. Факт технологической наследственности определяют по значению коэффициента изменения напряжений в поверхностных слоях.

На основе выше проведенного анализа предлагается использовать отпуск для снятия остаточных напряжений после проведения технологической операции механической обработки. Исследование влия-

ния отпуска на остаточные напряжения шарикоподшипниковых колец проводили по известной методике. Образцы прямоугольного сечения 9×6 мм и длиной 100 мм были вырезаны из колец, изготовленных по выше описанной технологии. Поверхность образцов была отшлифована до шероховатости поверхности $R_a = 0,32$ мкм. Для того чтобы избежать влияния механической обработки на внутренние напряжения, стравливался поверхностный слой толщиной примерно 15 мкм путем электрополировки, используя раствор хромового ангидрида в ортофосфорной кислоте. Варьирование уровня внутренних напряжений в образцах производили с помощью двухчасового отпуска при температурах 400, 500 и 600 °С.

Анализируя полученные результаты, пришли к выводу, что отпуск шарикоподшипниковых колец при температуре 600 ... 650 °С позволяет до минимальной величины снизить остаточные напряжения.

Апробирование результатов исследований провели на предприятии МАССАГЕТ ПЛЮС. Заводские условия обработки исследуемой стали проводятся следующими режимами резания. Для точения, как правило, применяется стандартный токарный проходной правый резец с углами $\gamma = 5^\circ$, $\varphi = 45^\circ$, $\varphi = 15^\circ$, $\varphi_1 = 8^\circ$, $\lambda = 0^\circ$ и радиусом $r = 2$ мм.

Режимы резания: для чистового точения: $V = 30$ м/мин, $s = 0,3$ мм/об, $t = 1,25$ мм; для тонкого точения $V = 200$ м/мин, $s = 0,12$ мм/об, $t = 0,3$ мм; для шлифования $V_{кр} = 35$ м/с, $V = 64$ м/мин, $s_{пр} = 0,8$ м/мин. Эксперименты показали, что образцы, обработанные заводскими режимами, без применения операции шлифования, имели характер эпюр идентичный лабораторным эпюрам. При отдельном чистовом точении образцов заводскими режимами, формируются выше отмеченные характерные эпюры. У самой поверхности образуются растягивающие напряжения, переходящие на глубине 60...70 мкм в напряжения сжатия. Общая глубина залегания остаточных напряжений находится в пределах 0,12...0,16 мм, которая значительно меньше величины снимаемого припуска при тонком точении ($Z_i = 0,3$ мм), т.е. заводские условия не отображают специфических условий технологического наследования. Таким образом, заводские образцы после проведения операций тонкого точения, получают заведомо «случайную» эпюру остаточных напряжений, которые своеобразно взаимодействуют с эпюрами, наведенными другими операциями на внутренней стенке образцов.

Этим, по нашему мнению, можно объяснить потерю точности форм и размеров. Для устранения данной погрешности, вызванной релаксацией остаточных напряжений, в данном конкретном случае, в технологический процесс обработки колец подшипников из стали ШХ15,

мы предлагаем ввести следующее сочетание режимов резания при последовательном выполнении операций чистового и тонкого точения.

Чистовое точение проводить режимами резания $V = 61$ м/мин, $s = 0,12$ мм/об, $t = 1,25$ мм, тонкое точение - $V = 200$ м/мин, $s = 0,084$ мм/об, $t = 0,1$ мм. Таким образом, общий припуск на тонкое точение снимается за три прохода. Изменение значений скорости резания и подачи чистового точения объясняется областью устойчивого резания.

Также при выполнении операции шлифования для того, чтобы целенаправленно формировать остаточные напряжения, необходимо величину поперечной подачи круга (припуск) назначать в интервале $0,01...0,05$ мм. Данное утверждение основывается на том, что при шлифовании формируются сжимающие напряжения, а после выполнения операций чистового и тонкого точения, растягивающие остаточные напряжения располагаются именно на этой глубине. В итоге образуются остаточные напряжения минимальной величины.

ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

В результате выполненных исследований решена актуальная задача в области исследования технологической наследственности остаточных напряжений и разработана рекомендация по их уменьшению. По результатам работы можно сделать следующие выводы:

1. Анализ стабильности размеров подшипниковых колец после прохождения полного цикла обработки и контроля качества в процессе вылеживания показал, что происходит потеря точности диаметрального размера и формы.

2. Комплексное исследование причин снижения качества подшипниковых труб и колец показало, что причиной является технология, не учитывающая формирование параметров качества поверхности, в частности, остаточных напряжений формируемых в поверхностном слое.

3. Анализ и исследование остаточных напряжений в поверхностном слое общеизвестным методом Давиденкова-Биргера и рентгенодифракционным методом позволили установить закономерности зависимости формирования величины и знака остаточных напряжений.

4. Разработана методика расчета остаточного напряжения при прокатке толстостенных труб на редуционном стане в среде Autodesk Inventor, на основе которой расчетным путем доказана возможность нарушения сплошности исследуемых труб по внутренней поверхности.

5. Методом конечных элементов получены количественные данные и установлены основные закономерности распределения НДС и остаточных напряжений при прокатке подшипниковых труб на редуционном стане.

6. Выявлены закономерности влияния температурных режимов отпуска на изменение остаточного напряжения в подшипниковых трубах и кольцах различного диаметра, и на основе этих закономерностей усовершенствована технология прокатки труб и изготовления колец, обеспечивающая снижение остаточных напряжений.

7. Изучены влияния технологической наследственности обработки на формирование остаточного напряжения (это не вывод) и за счет вариации технологических и геометрических параметров обработки усовершенствована технология, обеспечивающая получение подшипниковых колец без остаточного напряжения.

8. Опытно-промышленной проверкой предложенного способа обработки подшипниковых колец, проведенной на предприятии МАССА-ГЕТ ПЛЮС, показано повышение ресурса работы подшипниковых колец.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ ОТРАЖЕНЫ В СЛЕДУЮЩИХ ПУБЛИКАЦИЯХ

1. **Тусупбекова Г.М.** Режим обработки и размерная погрешность цилиндра. [Текст] / Г.М. Тусупбекова // «Вестник КазНТУ». – Алматы: КазНТУ. – 2004. – Выпуск №1.- С. 70-72
2. **Тусупбекова Г.М.** Производительность автоматов 1-4 классов. [Текст] / Г.М. Тусупбекова, М.Р Тусупбеков., Е.А Гагиева. // Труды/ Материалы Международной научной конференции «Актуальные проблемы механики машиностроения». – Алматы. – 2005. – Т. III. – С. 49-53
3. **Тусупбекова Г.М.** Исследование технологической наследственности при механической обработке. [Текст] / Г.М. Тусупбекова // Труды / Вторая Международная научно-практическая конференция посвященная 15-летию независимости Республики Казахстан «Горное дело и металлургия в Казахстане. Состояние и перспективы». – Алматы. – 2006. – Т. 1 – С. 362
4. **Тусупбекова Г.М.** Влияние поверхностной деформации (ППД) на остаточные напряжения. [Текст] / Г.М. Тусупбекова // Труды/Вторая Международная научно-практическая конференция посвященная 15-летию независимости Республики Казахстан «Горное дело и металлургия в Казахстане. Состояние и перспективы»: – Алматы. – 2006. – Т. 1 – С. 364
5. **Тусупбекова Г.М.** Технологические отклонения от подобиия и суммарное проявление масштабного фактора. [Текст] /Д.М.Бимен, А.Т. Альпеисов, Г.М Тусупбекова // Труды Международная научная

- конференция «Наука и образование – ведущий фактор стратегии «Казахстан- 2030». – Караганда. –2007. – Вып. 2. – С. 331
6. **Тусупбекова Г.М** Образование остаточных напряжений после механической обработки. [Текст] /Д.М.Бимен, А.Т. Альпеисов, Г.М Тусупбекова./Труды/ Международная научная конференция «Наука и образование–ведущий фактор стратегии «Казахстан- 2030».– Караганда. – 2008. – С. 97
 7. **Тусупбекова Г.М.** Комплексное исследование процесса резания. [Текст] / Д.М.Бимен, А.Т. Альпеисов, Г.М Тусупбекова//Труды Международной научной конференции «Наука и образование – ведущий фактор стратегии«Казахстан- 2030». – Караганда. – 2008. – С. 99
 8. **Тусупбекова Г.М.** Исследование остаточных напряжений, возникающих при обработке тонкостенных втулок. [Текст] / Г.М. Тусупбекова / Наука и новые технологии, № 3- Бишкек, 2011.- С. 48-52.
 9. **Тусупбекова Г.М.** Взаимосвязь технологических остаточных напряжений поверхности после механической обработки. [Текст] / Г.М. Тусупбекова / Наука и новые технологии, № 3- Бишкек, 2011- С. 32-37.
 10. **Тусупбекова Г.М.** Исследование технологической наследственности при механической обработке. [Текст] /Г.М. Тусупбекова / Известия Вузов, № 3- Бишкек, 2011- с.38-40.
 11. **Тусупбекова Г.М.** Анализ влияния поверхностной пластической деформации на остаточные напряжения. [Текст] / Г.М Тусупбекова / Известия Вузов, № 3- Бишкек, 2011- с.25-27.

Резюме

05.02.08 – машине куруу технология кесибн боюнча техника илимий кандидатынын окумуштуу даражасына талапкерлик «Муунак жаздыктардын шакектеринин калдык чыгалууларын технологиялык тукум куучулугун талдоо жана аларды азайтуу сунуштарын иштеп чыгаруу» темадагы

Тусупбекова Гульнара Махабатовнанын диссертациясына.

Тамыр сөздөр: калдык чыгалуулар, иритес, тшпшктёр, макротшщм, микротшщм, шакектер, таза жонуу, жука жонуу, жаюу, берщщ, агуучулук чеги, кескич, кесщщ ылдамдыгы, бщщлөө, болот.

Ирилдөө объекти - муунак жаздыктык тшпшктёрдщн жана шакектердин жаюу жана механикалык иштетщщ технологиясы.

Иш максаты – ар кандай диаметрдеги муунак жаздыктык тшцк-тёрдшн жана шакектердин калдык чыгалууларын аныктоо маселелерин чечшц сан тшршндё жана эмпиририкалык жоболорун иштеп чыгаруу жана чыгалуулардын азайуусун камсыздоочу жабы технологиялык иштетшц тартиптерин иштеп чыгаруу.

Изилдөө ыкмалары жана аппаратурасы.

Ыкмалык ЧМА (чыгалып-майышуу абал) назариятынын, тшцкк-тёрдшн жаюу жараяндарынын соьку элементтик цлгшлдёсшн колдонуусунда негизделет. Назарияттык эсептөөгё

Autodesk Inventor программалык комплекстери колдонгон. Калдык чыгалууну аныктоого Давиденков-Биргер жана рентгендифракциялык усулдары колдонгон. Эксперименттердин жыйынтыгын иштетшцгё математикалык статистика аппараты колдонулган.

Алынган жыйынтыктар жана алардын жабылылыгы: Басаьдатуу иритесте калыг тшцкк-тёрдшн жаюусунда калдык чыгалуусун эсептөө ыкмасы иштетилип чыгарылган жана анын негизинде эсеп тшршндё изилдөөчш тшцкк-тёрдшн ички бетинин туташынын бузулуусунун шцмкшнчшлшцш далилденген. Сандык берилиштер алынган жана ЧМА бёлшштшршщсшншн, ошондой эле басаьдатуу иритесте тшцкк-тёрдшн жаюу учурунда калдык чыгалууларын негизги мыйзамченмдери аныкталган; ар кыл диаметрлшц тшцкк-тёр жана шакектердеги калдык чыгалуулардын ёзгёршлшщшнё температуралык бошотуусунун тартибинин таасир этшцсшншн мыйзымченмдери табылган жана анын негизинде калдык чыгалуулаын азайтуусун камсыздоочу тшцкк-тёрдшн жаюунун жана механикалык иштетшцшншн технологиясы жетилтилген; калдык чыгалуунун пайда болушуна иштетшцшншн технологиялык тукумуучулук таасири излденген жана иштетшцшншн технологиялык параметрлерин ёзгёртшц жолу менен калдык чыгалуусуз муунак жаздыктардын шакектерин чыгаруу технологиясы жатилтилген.

Колдонуу даражасы: алынган жыйынтыктар МАССАГЕТ ПЛЮС ишканасында муунак жаздык шакектерин иштетшцсшндё текшерилип алардан иштөө мёёнётшншн жогорлошун кёрсётшц. Иштин жыйынтыктары «Машинекуруу» кесиптеги чыгаруучу квалификациялык иштерин аткарууда окуу жараянында колдонулат.

Колдонуучу тармактар: машинекуруу ишканаларда муунак жаздык шакектерин иштеп чыгаруу технологиясы.

РЕЗЮМЕ

диссертации Тусупбековой Гульнары Махабатовны на тему: «Анализ технологической наследственности остаточных напряжений подшипниковых колец и разработка рекомендаций по их уменьшению» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.08 –Технология машиностроения

Ключевые слова: остаточные напряжения, стан, трубы, макро-структура, микроструктура, кольца, чистовое точение, тонкое точение, прокатка, подача, предел текучести, резец, скорость резания, шлифование, обработка, сталь.

Объект исследования: технология прокатки и механической обработки подшипниковых труб и колец.

Цель работы: разработка численного и эмпирического метода решения задачи по определению остаточных напряжений в подшипниковых трубах и кольцах разного диаметра и разработка новых технологических режимов обработки, обеспечивающих их уменьшение.

Методы исследования и аппаратура. Методика базируется на использовании теории НДС, конечно-элементном моделировании процессов прокатки труб. Для теоретического расчета использованы программные комплексы Autodesk Inventor. Для определения остаточного напряжения использовали метод Давиденкова-Биргера и рентгенодифракционный метод. Для обработки результатов экспериментов использовали аппарат математической статистики.

Полученные результаты и их новизна. Разработана методика расчета остаточного напряжения при прокатке толстостенных труб на редуционном стане и на основе этой методики расчетным путем доказана возможность нарушения сплошности исследуемых труб по внутренней поверхности. Получены количественные данные и установлены основные закономерности распределения НДС и остаточных напряжений при прокатке труб на редуционном стане; выявлены закономерности влияния температурных режимов отпуска на изменение остаточного напряжений в трубах и кольцах различного диаметра и на основе этих закономерности усовершенствована технология прокатки труб и механической обработки, обеспечивающих снижение остаточных напряжений; изучены влияния технологической наследственности обработки на формирование остаточного напряжения и за счет вариации технологических параметров обработки усовершенствована технология, обеспечивающая получение подшипниковых колец без остаточного напряжения.

Степень использования: полученные результаты апробированы при обработке подшипниковых колец на предприятии МАССАГЕТ

ПЛЮС и показали повышение ресурса их работы. Результаты работы используются в учебном процессе при выполнении выпускных квалификационных работ по специальности «Машиностроение»

Область применения: технология обработки подшипниковых колец на машиностроительных предприятиях.

SUMMARY

Tusupbekova Gulnara Makhabatovna's dissertations on a subject «The analysis of technological heredity of residual tension of bearing rings and development of recommendations about their reduction» on competition of a scientific degree of Candidate of Technical Sciences in the specialty 05.02.08 – Technology of mechanical engineering

Keywords: residual tension, tension, camp, pipes, macrostructure, microstructure, rings, fair tocheniye, thin tocheniye, rolling, giving, fluidity limit, cutter, speed of cutting, grinding, processing, steel.

Object of research - technology of rolling and machining of bearing pipes and rings.

The work purpose - development of a numerical and empirical method of the solution of a task of definition residual tension in bearing pipes and rings of different diameter and realization of new technological modes of the processing providing reduction of residual tension.

The object of research - technology of rolling and the

Technique of researches is based on use of the theory of the VAT, final and element modeling of processes of rolling of pipes. For theoretical calculation the program Autodesk Inventor complexes are used. Objects of research are the technology of rolling and machining of bearing pipes and rings, and also the samples processed in the rolling mill and the mechanical equipment. For determination of residual tension used Davidenkova-Birger's method and a rentgenodifraktsionny method. For processing of results of experiments used the device of mathematical statistics.

Scientific novelty are results of a solution on improvement of the production technology of the bearing rings, allowing to raise quality of production. Thus: - it is developed design procedures of residual tension when rolling thick-walled pipes on a reduktsionny camp and on the basis of this technique by a settlement way it is proved possibility of violation of a sploshnost of studied pipes on a vnutrenny surface; - quantitative data are obtained and the main consistent patterns of distribution of the VAT and residual tension are determined when rolling pipes on a reduktsionny camp; - regularities of influence of temperature modes of holiday on change residual tension in pipes

and rings of various diameter are revealed and on the basis of these regularity the technology of rolling of pipes and the machining, residual tension providing decrease is improved; - influences of technological heredity of processing on formation of residual tension are studied and at the expense of a variation of technological parameters of processing the technology, bearing rings providing receiving without residual tension is improved.

Results and novelty. The method of calculation of residual stress in the rolling of thick-walled pipes on reducing mill and on the basis of this method calculated proof Zana opportunity discontinuity study of pipe inner surface. The quantitative data and established the basic patterns of distribution of VAT and residual stresses in rolling tubes on reducing mill, revealed regularities of the influence of temperature conditions leave the change of residual stresses in the tubes and rings of different diameters and, based on these patterns improved technology of rolling tubes and fur -mechanical treatment that reduce residual stresses, studied the influence of technological heredity treatment on the formation of residual stresses and by varying the process parameters improved processing technology, providing reception bearing rings without residual stress.

Degree of use: the results were tested at processing bearing rings in the enterprise Massaget PLUS and showed an increase of their share of work. The results of the use in the learning process when the final qualificationnyh works on specialty "Engineering

Scope: processing technology bearing rings machine-building enterprises.

A handwritten signature in cursive script, appearing to read 'Ilycyl-'.