

**Национальная академия наук Кыргызской Республики
ИНСТИТУТ МАШИНОВЕДЕНИЯ**

**Министерство образования и науки Кыргызской Республики
КЫРГЫЗСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ им. И. Раззакова**

ЖАЛАЛ-АБАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Диссертационный совет Д. 05. 13. 010

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**

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 – 2014

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
Муслимов Аннас Поясович

кандидат технических наук, доцент
Самсалиев Анвар Амантаевич

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

Защита состоится «3» октября 2014 года в 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д. 05.13.010 при Институте машиноведения Национальной академии наук Кыргызской Республики, Кыргызском государственном техническом университете им. И. Раззакова и Жалал-Абадском государственном университете Министерства образования и науки Кыргызской Республики по адресу: Кыргызская Республика, г. Бишкек, пр-т Мира, 66.

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. 05.13.010, e-mail: *imash_kg@mail.ru*

Телефон для справок: (0312) 541149, факс: (0312) 562785

Автореферат разослан « 2 » сентября 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д. 05.13.010,
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. В связи с этим разработка рациональных параметров технологического процесса изготовления деталей, обеспечивающих высокую точность, малую себестоимость, сохранение точности изготовления при эксплуатации, является перспективной задачей машиностроения. Необходимо отметить, что остаточные напряжения являются одним из показателей, уменьшающих качество при эксплуатации. Искажение формы деталей остаточным напряжением всегда приводит к уменьшению долговечности, срока службы техники и эксплуатационных показателей машин.

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 упругопластическом 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 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 технологии, обеспечивающей снижение остаточного напряжения при прокатке;
- разработка методики расчета остаточного напряжения при прокатке труб на редуционном стане и методики изучения 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.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. методика расчета остаточного напряжения при прокатке толстостенных труб на редуционном стане, а также закономерности нарушения сплошности подшипниковых труб по внутренней поверхности;
2. количественные данные и основные закономерности распределения НДС и остаточных напряжений при прокатке подшипниковых труб на редуционном стане;
3. 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;
4. закономерности влияния технологической наследственности обработки на формирование остаточного напряжения, а также усовершенствованная технология, обеспечивающая 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 доказана 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 остаточных напряжений в подшипниковых трубах и кольцах различного диаметра и усовершенствована технология прокатки труб и механической обработки, обеспечивающие снижение остаточных напряжений;

– за счет вариации технологических и геометрических параметров обработки усовершенствована технология, обеспечивающая получение подшипниковых колец без остаточного напряжения.

Практическая значимость полученных результатов. Определены рациональные параметры процесса точения подшипниковых труб и разработаны научно обоснованные технологические режимы изготовления подшипниковых колец; усовершенствованы температурные режимы отпуска подшипниковых труб, способствующие получению изделия требуемой формы с минимальным количеством остаточных напряжений. Опытнo-промышленная проверка предложенного способа обработки подшипниковых колец, проведенная на предприятии МАССАГЕТ ПЛЮС, показала повышение ресурса работы подшипниковых колец.

Экономическая значимость полученных результатов. Разработанные рекомендации направлены на повышение эффективности производства и улучшения качества труб и колец, ожидаемый экономический эффект от их внедрения в производство составит более 35.714 у.е.

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» (г. Караганда, 2007 г., 2008 г.)

Публикации. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 11 научных трудах.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 4-х глав, заключения, списка использованных источников, включающего 102 наименования, и 1 приложения. Объем диссертации – 150 страниц машинописного текста, 4 таблицы, 51 рисунок.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе доказывается, 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. 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 проанализировано напряжено-деформированное состояние (НДС) при прокатке труб в редуционном трубопрокатном стане, применена известная методика решения упруго-пластичных задач, т.е. метод конечных элементов (МКЭ).

Известно, что при решении задачи прокатки МКЭ анализируемый очаг деформации разбивается на большое количество малых по размеру конечных элементов, при этом принимается допущение, что конечные элементы взаимодействуют друг с другом только узловыми точками. В данной методике неизвестными является функциональная зависимость перемещения или скорости перемещения узловых точек от координат. Данная функциональная зависимость аппроксимируется степенными полиномами, зависящими от значений этой функции узлах конечных элементов. Таким образом, при определении НДС прокатываемых на редуционном стане заготовок основной задачей является нахождение неизвестных по величине перемещений узлов конечных элементов. По известным перемещениям определяют деформации, а по деформациям – напряжения.

Для расчета НДС использована техническая характеристика редуционного стана. Для прокатки труб $\varnothing 110$ мм на редуционном стане использовалась труба толщиной $s_0 = 8$ мм.

Длина прокатываемых труб выбиралась равная $(2,0...2,2)D$ мм, где D – диаметр прокатываемых труб. Это позволило уменьшить время

вычисления и размеры конечно-элементной модели. Время определения НДС прокатываемой трубы в каждой клетке равнялось 6 – 8 мин на компьютере Pentium Duo с тактовой частотой 3,4 ГГц и оперативной памятью 2 Гбайт.

В качестве материала инструмента был выбрана сталь 60ХН, а в материале заготовки свинцовосурьмянистый сплав с температурным диапазоном деформирования 22 – 300 °С и с механическими свойствами: модуль упругости равен 14 ГПа, коэффициент μ - 0,3 и плотность - 11300 кг/м³. Для материала инструмента плотность и тепловые свойства программа Autodesk Inventor назначила по умолчанию. Для моделирования пластичности материала заготовки выбрана упругопластическая модель Джонсона-Кука. Для моделирования трения между металлом и валком использован закон Кулона. Коэффициент трения принят равным 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 конечных обжатий каждой стадии деформирования.

На основе полученных результатов численного моделирования установлено, что:

1) при прокатке труб во всех клетях редуционного стана компоненты тензора напряжений локализуются в отдельных участках толстостенной трубы;

2) при прокатке на редуционном стане в большинстве случаев сжимающие и растягивающие компоненты тензора напряжений сосредотачиваются на внешней поверхности труб;

3) при приложении нагрузки обратной, чем при прокатке в клетях редуционного стана, в большинстве случаев сжимающие и растягивающие напряжения сосредотачиваются на внутренних поверхностях труб;

4) после прокатки на редуционном стане упругие сжимающие смещения возникают на внешней поверхности, а упругое растягивающие смещения – на внутренней поверхности труб;

5) при прокатке на редуционном стане наибольшие по величине интенсивности напряжений возникают на внутренней поверхности прокатываемых труб.

Во второй главе произведен расчет остаточных напряжений, чтобы вычислить остаточные напряжения в пластически деформируемом теле после снятия нагрузки, используем теорему о разгрузке. Терма предполагает, что при разгрузке не возникают вторичные деформации, и она осуществляется только упруго.

Следуя теореме, определено поле напряжений в толстостенной трубе, находящейся под воздействием внешней нагрузки обратной, чем нагрузка, возникающая при прокатке на редуционном стане.

Применяя программу Autodesk Inventor, исследовано напряженно-деформированное состояние труб при нагрузке обратной, чем при прокатке на редуционном стане.

Представлены картины распределения напряжений σ_{xx} , σ_{yy} , σ_{zz} и σ_{xz} в сравнительно толстостенной трубе при нагрузке обратной, чем при прокатке в четных клетях редуционного стана. 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.

Согласно теореме о разгрузке остаточные напряжения будут равны алгебраической сумме 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.

Анализ показал, что прокатка толстостенных труб на редуционном стане, как одна из завершающих операций производства толстостенных труб для подшипников, обладает существенными недостатками, предопределяющими получение дефектов на внутренней или внешней поверхности труб. Это обстоятельство послужило основанием предложить применение в технологии прокатки отпуска с рациональной температурой нагрева после прокатки на редуционном стане.

В третьей главе исследованы образцы, вырезанные из труб диаметром \varnothing 60,3, 89, 127 и 168 мм и толщиной стенки 6 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 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 с использованием раствора хромового ангидрида в ортофосфорной кислоте.

Варьирование уровня внутренних напряжений в образцах производилось с помощью двухчасового отпуска при температурах 150 °С, 300 °С, 450 °С и 600 °С. Выбор указанной верхней температуры отпуска была связана 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 отпуска охлаждались с печью и затем вновь подвергались электрополировке для удаления окисленного слоя. Исследованы также образцы и в исходном состоянии, без отпуска.

Рентгеноструктурный анализ производился на дифрактометре X.Pert MPD PRO (PANalytical) с использованием K_α излучения хромового анода. Используя рентгеновский дифрактометр, исследовано четыре зоны, расположенные под 90° относительно друг друга на внешней поверхности заготовок. Анализ напряжений осуществлялся по линии α -фазы (двойной угол дифракции $2\theta \approx 158^\circ$). Толщина анализируемого слоя, дающая 90 % интенсивности дифрагированного пучка, составляет 15 мкм. Угол ψ принимался равным 0°, 10°, 20°, 30°, 40°. Образцы на рентгеновском дифрактометре устанавливались таким образом, чтобы определять макронапряжения в тангенциальном направлении образца.

На основе экспериментов рассчитана величина макронапряжений методом $\sin^2\psi$. Анализ полученных результатов позволил сделать вывод, что в тангенциальном направлении у заготовок Ø 60,3, 89, 127 и 168 мм наблюдаются остаточные напряжения разного знака, что может привести при их дальнейшей обработке к овальности. 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 основании экспериментально полученных данных необходимо применять отпуск в диапазоне температур от 600 °С до 650 °С.

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 этого метода удаление слоев произведено путем электрохимического травления в известной установке для исследования остаточных деформаций.

Окружные остаточные напряжения исследованы для трубы длиной 100 мм с наружным диаметром 60,3 мм и внутренним - 54,3 мм из стали ШХ15 с использованием статистического метода планирования

эксперимента. Из этих труб нарезались кольца шириной $10 \pm 0,2$ мм, которые 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. Выбраны следующие: глубина резания $t = 1,0$ мм; скорости резания v , равные 31; 48 и 61 м/мин.; подачи S , равные 0,12, 0,29 и 0,48 мм/об. Режущий инструмент имел геометрические параметры: передний угол γ принимался равным -5°; 0°; 5°; задний угол $\alpha = 9^\circ$; главный угол в плане $\phi = 45^\circ$; вспомогательный угол в плане $\phi_1 = 12^\circ$; радиус при вершине резца $r = 1$ мм.

При этом величина температур и сил резания зависели от способов и режимов резания. При обработке образцов принятыми режимами резания экспериментально возможно определить значение температуры и сил резания соответствующей операцией, а это в свою очередь позволяет определить влияние температурного и силового поля или одновременного их воздействия на величины остаточных напряжений.

Микротвердости поверхностных слоев исследовались методом вдавливания алмазной пирамиды на приборе ПМТ-ЗМ.

Результаты экспериментов показали, что:

- на глубине 30...45 мкм формируются максимальные по величине остаточные напряжения растяжения;
- для стали ШХ15 распределение остаточных напряжений по глубине зависит как от значений подачи, так и от скорости и угла резания;
- увеличение подачи s от 0,29 до 0,48 мм/об при $v = 61$ м/мин, $t = 1,0$ мм и $\gamma = 5^\circ$ вызывает возрастание величины остаточных напряжений растяжения в периферийных слоях от 450 до 500 МПа;
- увеличение подачи не только вызывает повышение 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 величины переднего угла приводит к снижению величины остаточных напряжений, при этом для кольца из стали ШХ15 величина остаточных напряжений изменяется от 310 до 450 МПа;
- при скоростях резания $v \leq 64$ м/мин температура резания недостаточна для увеличения пластичности обработанного материала, происходит увеличение составляющих сил резания, т.е. с увеличением ско-

рости резания пропорционально растет величина работы пластической деформации;

- при скорости резания больше $v = 64$ м/мин повышается температура резания, т.е. увеличивается пластичность материала и снижается коэффициент трения сходящей стружки по передней поверхности инструмента. Все это приводит к уменьшению величин сил резания при $v \geq 64$ м/мин.

- изменение подачи оказывает значительное влияние на величину силы резания, с увеличением подачи возрастает площадь срезаемого слоя.

По результатам эксперимента построен график зависимости контактной температуры в зоне резания от подачи и скорости резания. С увеличением скорости резания температура (в области исследуемых величин) в зоне резания увеличивается с различной интенсивностью.

Полученные данные показали, что меньшее влияние на температуру в зоне резания оказывает подача. Сравнение закономерности изменения кривых температуры резания и остаточных напряжений в периферийном слое деталей показывает их аналогичную закономерность.

Установленная закономерность показывает большое влияние температуры резания, т.е. скорости резания, на образование растягивающих остаточных напряжений. Такое влияние возможно в случае, когда температура в металле, вызванная напряжением, больше или равна пределу текучести, т.е. осуществляется термопластическая деформация.

Проведенные эксперименты показали, что для стали ШХ15 температура резания при обработке вышеприведенными режимами резания лежит в пределах $600 \dots 800$ °С. На основе полученных данных сделано заключение, что на формирование остаточных напряжений в периферийной зоне детали из стали ШХ15 оказывает большое влияние на температуру резания зависящая от термопластической деформации.

Известно, что под действием температуры резания в периферийной зоне могут произойти фазовые превращения, которые определяют параметры остаточных напряжений в поверхностном слое металла. Исследование микроструктуры показало, что при точении подшипниковых сталей в периферийных зонах при исследуемых режимах резания фазовое превращение не наблюдается. Однако, в поверхностном слое детали зерна металла вытягиваются в направлении скорости резания.

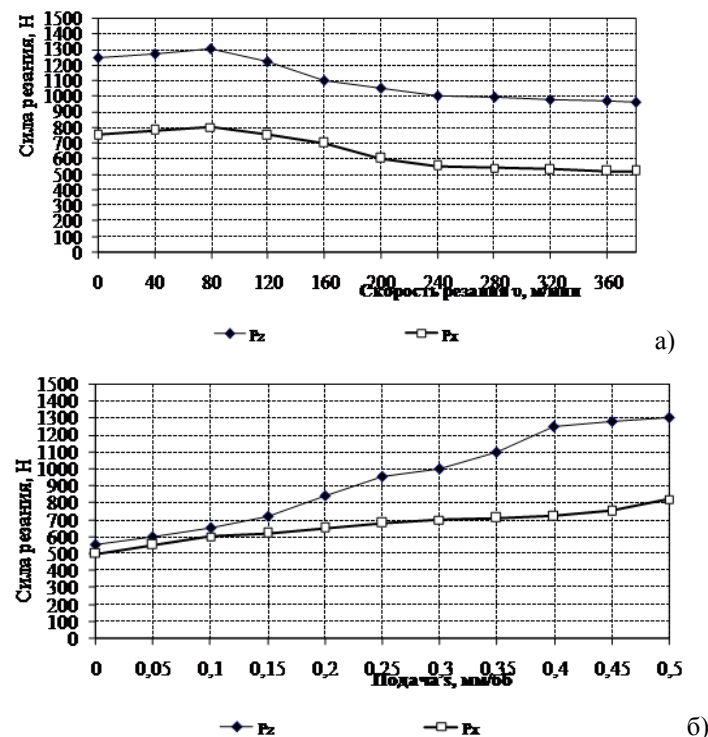


Рисунок 1 - Влияние скорости резания (а) ($t = 1,25$ мм; $s = 0,29$ мм/об) и подачи (б) на силу резания при точении стали ШХ15

Измерение микротвердости произведено после чистового и тонкого точения и показало, что чистовое точение не привело к значительным изменениям микротвердости.

Отмечено, что при чистовом точении в периферийной зоне металла формируются растягивающие остаточные напряжения, которые на определенной глубине меняются на сжимающие напряжения. Наибольшие значения растягивающих остаточных напряжений располагаются от поверхности на глубине $30 \dots 45$ мкм. При этом остаточные напряжения распространяются на глубину $120 \dots 130$ мкм в зависимости от режимов резания. Наибольшая величина сжимающих напряжений располагается на глубине $120 \dots 130$ мкм. Учитывая изложенное, исследовано при тонком точении влияние подачи, скорости резания, глубины резания и переднего угла резца на остаточные напряжения и шероховатость деталей.

При тонком точении для определения глубины резания учитывалась глубина распространения остаточных напряжений при чистовом точении и расположение наибольших по величине сжимающих напряжений. Тонкое точение осуществлялось глубиной резания $t = 0,2$ мм и $t = 0,1$ мм.

Из полученных результатов следует, что:

- тонкое точение скоростями резания $v = 200...320$ м/мин при $s = 0,12$ мм/об, $t = 0,3$ мм резцом с углом $\gamma = 0$ приводит к формированию в периферийном слое стали ШХ15 растягивающих остаточных напряжений, которые на глубине $80...100$ мкм переходят в сжимающие напряжения;
- увеличение скорости резания вызывает увеличение наибольших по величине остаточных напряжений в периферийном слое (в $1,2...1,3$ раза);
- при точении резцом с передним углом $\gamma = -5^\circ$ со скоростями резания $v = 160...320$ м/мин и подачами $s = 0,097$ мм/об и $0,1$ мм/об приводит к формированию в периферийной зоне стали ШХ15 растягивающих остаточных напряжений величиной $224...395$ МПа;
- при точении резцом с передним углом $\gamma = -5^\circ$ величина растягивающих остаточных напряжений в $1,5...2$ раза меньше, по сравнению резцом с $\gamma = 0$;
- при точении с глубиной резания $t = 0,1$ мм и углом $\gamma = -5^\circ$ при постоянстве других факторов величина растягивающих напряжений уменьшается в $1,6...4,0$ раза, знак остаточных напряжений изменяется на глубине $80...100$ мкм.

Анализ полученных данных показывает, что подача, скорость резания и передний угол резца оказывают влияние на величину растягивающих остаточных напряжений и глубину изменения знака напряжений. При постоянстве других факторов изменение глубины резания не оказывает большого влияния на величину остаточных напряжений.

Закономерности формирования остаточных напряжений при тонком точении объясняются большим температурным напряжением. Оно характеризуется также высоким их градиентом. При этом силы резания изменяются незначительно.

Известно, что во всем технологическом процессе механической обработки формируется качество поверхности и геометрическая точность готовой детали машин. При этом от операции к операции переходят отдельные свойства и характеристики детали. Таким образом, отдельные свойства и характеристики детали «наследуются» от предыдущих операций, т.е. можно отметить, что при обработке деталей имеет место технологическая наследственность.

Приводятся результаты экспериментальных исследований по нахождению остаточных напряжений и формируются в периферийной зоне детали после комплексного выполнения таких операций, как чистовое и тонкое точение. При этом режимы резания чистового и тонкого точения соответствовали режимам резания при раздельном выполнении чистового и тонкого точения. Однако, при выполнении комплекса операций как чистовое и тонкое точения режимы резания выполнялись в различных сочетаниях. Такое исследование позволило установить степень влияния каждой операции на формирование остаточных напряжений при изменении режимов обработки отдельных операций всего технологического процесса.

Результаты исследования показали, что:

- в периферийной зоне окончательно обработанных деталей после проведения комплекса операций формируются растягивающие остаточные напряжения;
- 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;

Уменьшение максимальных значений остаточных напряжений растяжений объясняется тем, что на глубине $40...50$ мкм при чистовом точении сжимающие остаточные напряжения достигают своих наибольших величин. Необходимо отметить, что полученные величины напряжений суммируются с растягивающими остаточными напряжениями, которые формируются в периферийном слое режимами резания тонкого точения. Поэтому величина остаточных напряжений в периферийном слое у стали ШХ15 после чистового и тонкого точения определяется взаимодействующими полями остаточных напряжений этих операций.

Характер распределения результирующих остаточных напряжений в периферийном слое детали после выполнения чистового и тонкого точения отличаются. С одной стороны, наибольшими значениями остаточных напряжений, с другой стороны, уменьшением глубины распространения растягивающих остаточных напряжений.

Таким образом, полученные результаты подтверждают, что при обработке деталей машин появляется технологическая наследственность по остаточным напряжениям в периферийных слоях деталей. Степень

развития технологической наследственности зависит от сочетания режимов резания отдельных операций всего комплекса и величины снимаемого припуска на отдельных операциях. Технологическая наследственность детали определяется величиной коэффициента изменения напряжений в периферийных слоях.

На основе проведенного анализа предложено применять отпуск для снятия остаточных напряжений после проведения технологической операции механической обработки. Исследование влияния отпуска на остаточные напряжения шарикоподшипниковых колец проводили по следующей методике.

Образцы прямоугольного сечения 9×6 мм и длиной 100 мм вырезались из колец, изготовленных по выше описанной технологии. Поверхность образцов шлифовалась до шероховатости поверхности $R_a = 0,32$. 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 производилось с помощью двухчасового отпуска при температурах 400 °С, 500 °С и 600 °С.

Анализируя полученные результаты сделан вывод, что отпуск шарикоподшипниковых колец при температуре от 600 °С до 650 °С позволяет снизить остаточные напряжения до минимальной величины.

Заводские условия обработки исследуемой стали проводились при следующих условиях. Для точения, как правило, применяется стандартный токарный проходной правый резец с углами $\gamma = 5^\circ$, $\varphi = 45^\circ$, $\varphi_1 = 8^\circ$, $\lambda = 0^\circ$, $r = 2$ мм;

чистовое точение $v = 30$ м/мин, $s = 0,3$ мм/об, $t = 1,25$ мм;

тонкое точение $v = 200$ м/мин, $s = 0,12$ мм/об, $t = 0,3$ мм;

шлифование $v_{кр} = 35$ м/с, $u_d = 64$ м/мин, $s_{np} = 0,8$ м/мин, $i = 3$, $q = 0,06$ МПа.

Эксперименты показали, что образцы, обработанные заводскими режимами, без применения операции шлифования, имели характер эпюр идентичный лабораторным эпюрам. При раздельном чистовом точении образцов заводскими режимами формируются 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, 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 погрешности, вызванной релаксацией остаточных напряжений в данном конкретном случае в технологический процесс обработки колец подшипников из стали ШХ15 предложено 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. Это 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.

Результаты исследований прошли апробацию на предприятии МАССАГЕТ ПЛЮС и показали: выявлены закономерности формирования остаточных напряжений при обработке, определяющие зависимость максимальных значений остаточных напряжений от скорости резания, подачи и износа инструмента.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

В результате выполненных исследований решена актуальная задача в области исследования технологической наследственности остаточных напряжений и разработаны рекомендации 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 методом Давиденкова-Биргера и рентгенодифракционным методом позволили установить 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 доказана возможность нарушения сплошности исследуемых труб по внутренней поверхности.

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

6. Выявлены зависимости 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. За счет вариации технологических и геометрических параметров обработки усовершенствована технология, обеспечивающая получение подшипниковых колец без остаточного напряжения.

8. Опытнo-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 по-

священная 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 подобию 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.

05.02.08 – машине куруу технология кесиби боюнча техника илимий кандидатынын окумуштуу даражасына талапкерлик «Муунак жаздыктардын шакектеринин калдык чыңалууларын технологиялык тукум куучулугун талдоо жана аларды азайтуу сунуштарын иштеп чыгаруу» темадагы Тусупбекова Гульнара Махабатовнанын диссертациясына

КЫСКАЧА МАЗМУНУ

Тамыр сөздөр: калдык чыңалуулар, иритес, түтүктөр, макротүзүм, микротүзүм, шакектер, таза жонуу, жука жонуу, жаюу, берүү, агуучулук чеги, кескич, кесүү ылдамдыгы, бүлөө, болот.

Изилдөө объекти - муунак жаздыктык түтүктөрдүн жана шакектердин жаюу жана механикалык иштетүү технологиясы.

Иш максаты – ар кандай диаметрдеги муунак жаздыктык түтүктөрдүн жана шакектердин калдык чыңалууларын аныктоо маселелерин чечүү сан түрүндө жана эмпирикалык жоболорун иштеп чыгаруу жана чыңалуулардын азайтуусун камсыздоочу жаңы технологиялык иштетүү тартиптерин иштеп чыгаруу.

Изилдөө ыкмалары жана аппаратурасы.

Ыкмалык ЧМА (чыңалып-майышуу абал) назариятынын, түтүктөрдү жаюу жараяндарынын соңку элементтик үлгүлөөсүн колдонуусунда негизделет. Назарияттык эсептөөгө

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

Алынган жыйынтыктар жана алардын жаңылылыгы: Басандатуу иритесте калың түтүктөрдү жаюусунда калдык чыңалуусун эсептөө ыкмасы иштетилип чыгарылган жана анын негизинде эсеп түрүндө изилдөөчү түтүктөрдүн ички бетинин туташынын бузулуусунун мүмкүнчүлүгү далиленген. Сандык берилиштер алынган жана ЧМА бөлүштүрүүсүнүн, ошондой эле басандатуу иритесте түтүктөрдү жаюу учурунда калдык чыңалууларын негизги мыйзамченемдери аныкталган; ар кыл диаметрлүү түтүктөр жана шакектердеги калдык чыңалуулардын өзгөрүлүшүнө температуралык бошотуусунун тартибинин таасир этүүсүнүн мыйзамченемдери табылган жана анын негизинде калдык чыңалууларын азайтуусун камсыздоочу түтүктөрдү жаюунун жана механикалык иштетүүнүн технологиясы жетилтиген; калдык чыңалуунун пайда болушуна иштетүүнүн технологиялык тукумкуучулук таасири изденген жана иштетүүнүн технологиялык параметрлерин өзгөртүү жолу менен калдык чыңалуусуз муунак жаздыктардын шакектерин чыгаруу технологиясы жатилтилген.

Колдонуу даражасы: алынган жыйынтыктар МАССАГЕТ ПЛЮС ишканасында муунак жаздык шакектерин иштетүүсүндө текшерилип алардан иштөө мөөнөтүнүн жогорлошун көрсөтгү. 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 исследований базируется на использовании теории напряженно-деформированного состояния (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, доказана возможность нарушения сплошности исследуемых труб по внутренней поверхности. Получены количественные данные и установлены основные зависимости распределения НДС и остаточных напряжений при прокатке труб на редуционном стане; выявлены влияния температурных режимов отпуска на изменение остаточного напряжений в трубах и кольцах различного диаметра, усовершенствованы технологии прокатки труб и механической обработки, обеспе-

чивающих снижение остаточных напряжений; за счет вариации технологических параметров обработки усовершенствована технология, обеспечивающих 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.

Область применения: технология обработки подшипниковых колец на машиностроительных предприятиях.

SUMMARY

Tusupbekova Gulnara Makhbatovna'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 is intense-deformed condition (IDC), 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 IDC 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 IDC 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.

Подписано в печать 01.09.14. Формат 60×84^{1/16}

Офсетная печать. Объем 1,5 п.л.

Тираж 100 экз. Заказ 539.

Отпечатано в типографии КРСУ
720048, г. Бишкек, ул. Горького, 2