

На правах рукописи



ГУПАЛОВ БОРИС АЛЕКСЕЕВИЧ

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ВИБРАЦИОННОЙ ПРАВКИ
МАЛОЖЁСТКИХ ДЕТАЛЕЙ ТИПА ДИСКОВ**

Специальность 05.02.08 – «Технология машиностроения»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Челябинск – 2013

Работа выполнена в Новоуральском технологическом институте – филиале федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» (г. Новоуральск)

- Научный руководитель:** **Ничков Александр Григорьевич**,
доктор технических наук, профессор
- Официальные оппоненты:** **Мазеин Пётр Германович**
доктор технических наук, профессор
кафедры «Станки и инструменты»
ФГБОУ ВПО «Южно-Уральского
государственного университета» (НИУ)
- Журавлёв Михаил Петрович**
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Металлорежущие станки и
инструменты» ФГАОУ ВПО
«Уральского федерального университета
им. первого Президента России
Б.Н.Ельцина»
- Ведущая организация:** ФГБОУ ВПО «Омский государственный
технический университет», г.Омск

Защита диссертации состоится «17» октября 2013г. в 15:00 на заседании диссертационного совета Д212.298.06 при «Южно-Уральском государственном университете» (НИУ) по адресу: 454080, г. Челябинск, ул. Ленина, д.76, ауд.201а главного корпуса.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Южно-Уральского государственного университета.

Автореферат разослан «17» сентября 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.298.06



И.А. Щуров

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Отечественное машиностроение, в условиях постоянно развивающихся рыночных отношений, заинтересовано в выпуске современных и конкурентоспособных машин. В связи с этим, к деталям и узлам машин постоянно повышаются требования по качеству, надёжности, долговечности и другим показателям, от которых зависит работоспособность машин в целом. Среди множества различных деталей, обеспечивающих надёжную работу машин, имеются детали, которые обладают малой жёсткостью. На машиностроительных предприятиях большое внимание уделяется технологии изготовления маложёстких деталей, поскольку особенности геометрии и конструктивных параметров таких деталей создают серьёзные технологические трудности в обеспечении достижения требуемых параметров и допусков.

Одним из представителей высокоточных маложёстких деталей являются фрикционные диски. При технологической обработке фрикционных дисков в материале возникают различные виды остаточных напряжений. Со временем релаксация и перераспределение остаточных напряжений приводят к появлению значительного уровня остаточных деформаций изгиба и коробления деталей. Практика показывает, что процент брака по этим параметрам в опытной партии изделий может составлять более 50 %. Для исключения отрицательных явлений применяются различные виды стабилизирующей обработки (правки) деталей. Однако, используемые в производственных условиях способы правки, в некоторых случаях, не обеспечивают требуемую точность, либо дают временный результат, либо приводят к повреждению поверхности или требуют значительных энергетических затрат. Важность и актуальность дальнейшего решения проблемы стабилизации геометрических форм и размеров маложёстких изделий на основе новых прогрессивных технологий правки и современного технологического оборудования – несомненна, поскольку позволит расширить возможности предприятий в реализации неотложных задач повышения качества изготавливаемых машин, снижения трудоемкости изготовления деталей, повышения общей культуры и организации машиностроительного производства.

Целью диссертационной работы является повышение геометрической точности фрикционных дисков путём снижения остаточных технологических деформаций и напряжений за счет приложения внешнего усилия, создающего перегиб детали, и последующего наложения циклических деформаций.

Для достижения поставленной цели решаются следующие **задачи**:

1. Исследование точностных параметров фрикционных дисков, выявление характера и величины геометрических погрешностей формы деталей.
2. Установление причин и природы возникновения остаточных напряжений, способствующих формированию погрешности формы деталей.
3. Разработка основных положений и условий вибрационного метода повышения геометрической точности дисков.

4. Вывод аналитической зависимости, которая позволяет связывать конструктивные параметры деталей с технологическими параметрами процесса правки.
5. Выполнение экспериментальных исследований и обработка их результатов.
6. Создание опытно-промышленной установки или комплекса циклической деформации для осуществления высокоэффективной технологии правки маложёстких деталей.

Научная новизна работы:

1. На основе кинетических представлений о процессе циклической неупругой деформации впервые установлено, что при виброправке деталей, величина подводимой внешней энергии циклических колебаний обеспечивает контролируемую скорость релаксации остаточных технологических напряжений, тождественную скорости рассеяния энергии этих колебаний в материале.
2. Выявлено, что время процесса (число циклов) виброправки (как и время релаксации остаточных напряжений) определяется величиной обобщённого параметра, представляющего собой отношение мощности, релаксируемой диском при циклическом нагружении, к абсолютной температуре испытаний.
3. Разработана математическая модель процесса виброправки маложёстких деталей, которая позволяет определить для каждого значения начального прогиба величину статической деформации дисков при заданных параметрах режима виброправки.

Практическая ценность работы:

1. Разработан способ вибрационной правки нежёстких деталей (патент на изобретение РФ № 2484910)
2. Определены режимные параметры виброправки фрикционных дисков различных типоразмеров по номенклатуре ОАО «НПК «Уралвагонзавод» им. Ф.Э.Дзержинского (УВЗ).
3. Предложен робото-технологический комплекс (РТК) для осуществления операции правки и контроля геометрических параметров фрикционных дисков в заводских условиях.

Методы исследования, достоверность и обоснованность результатов.

Представленные результаты диссертационной работы получены на основе теоретических и экспериментальных исследований. Поставленные задачи решались на основе фундаментальных положений технологии машиностроения, кинетической теории длительной прочности, металловедения, при широком использовании математического моделирования и численных методов с привлечением средств вычислительной техники и современных программных пакетов. Экспериментальные исследования выполнялись в лабораторных условиях и включали в себя реализацию разработанной технологии вибрационной правки маложёстких деталей на примере фрикционных дисков посредством созданной экспериментальной установки, выявление закономерностей влияния режимных параметров циклического деформирования на физико-механические свойства

материала фрикционных дисков и снижение отклонений от плоскостности. Обработка экспериментальных данных осуществлялась с использованием аппарата математической статистики, в том числе, корреляционного и регрессивного анализа. Достоверность полученных результатов исследований подтверждается их воспроизводимостью и адекватностью.

Личный вклад автора состоит в постановке задач диссертации, разработке способа вибрационной правки нежестких изделий, проведении теоретических и экспериментальных исследований, обработке их результатов, формулировке выводов и положений, подготовке публикаций по данной теме.

Положения и результаты, выносимые на защиту.

1. Способ и установка вибрационной правки деталей машин.
2. Математическая модель процесса вибрационной правки и стабилизации геометрических параметров изделий.
3. Результаты теоретических и экспериментальных исследований для обоснования механизмов правки.
4. Рекомендации по выбору режимов вибрационной стабилизации, не снижающих усталостной прочности обрабатываемых деталей, и условий вибрационного нагружения, обуславливающих эффективность применения правки дисков.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на IX научно-практической конференции «Дни науки 2011. Ядерно-промышленный комплекс Урала» (г. Озёрск, 2011 г.), на выездной научной сессии НИЯУ МИФИ (г. Снежинск, 2011-2012 г.г.), на всероссийской конференции «Машиностроение – традиции и инновации» (г. Юрга, 2011 г.), на международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития сборочно-сварочного производства, посвященной 75-летию сварочного производства ОАО «НПК «Уралвагонзавод» (г. Нижний Тагил, 2011 г.), на X научно-практической конференции «Инновационные технологии как фактор повышения качества и конкурентоспособности», (г. Нижний Тагил, 2011 г.), на научно-технической конференции «Транспорт XXI века: исследования, инновации, инфраструктура» (г. Екатеринбург, 2011 г.), на XXIII международной конференции молодых ученых и студентов «МИКМУС - 2011» (Москва, 2011 г.), на XV международной конференции «Молодёжь и наука», (Москва, 2012 г.), на II научно-практической конференции студентов и аспирантов НТИ НИЯУ МИФИ, (г. Новоуральск, 2012 г.), на VII международной научно-технической конференции «Автоматизация и прогрессивные технологии в атомной отрасли», (г. Новоуральск, 2012 г.), на VII международном симпозиуме по фундаментальным и прикладным проблемам науки (с. Непряхино Челябинской обл., 2012 г.), на научном семинаре кафедры технологии машиностроения ОмГТУ (г. Омск, 2013 г.)

Публикации. По основным материалам диссертационной работы опубликовано 12 работ, в том числе один патент на изобретение РФ, две статьи в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ, а также других научных изданиях – 9.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, основных выводов, списка литературы из 147 наименований, приложения. Основной текст диссертации изложен на 183 страницах машинописного текста, в том числе, имеется 69 рисунков и 20 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, ее цель и задачи, приведены основные результаты работы.

В первой главе рассмотрены и проанализированы работы, посвящённые современному состоянию вопроса по технологическому обеспечению качества и надёжности маложёстких деталей машин. Приведены факторы, влияющие на геометрическую точность при производстве изделий, а именно, показано то, что используемые технологические системы вносят свои погрешности в изготавливаемые детали, а конструктивная форма заготовки порождает отклонения от правильных геометрических форм. В итоге формируются технологические остаточные деформации изгиба, которые сравнимы или могут превышать допуски на размеры деталей.

На основе исследований В.Е. Антонюка, А.С. Васильева, Я.Д. Вишнякова, А.М. Дальского, О.И. Драчёва, О.Ю. Коцюбинского, Е.Н. Мошнина, В.Г. Подпоркина, Г.С. Ракошица, Э.В. Рыжова, В.М. Сагелевича, А.Г. Сулова, А.З. Слонима, А.Л. Сонины, М.Л. Хейфеца, П.И. Ящерицына и других учёных в главе дан обзор существующих методов управления действием технологических остаточных деформаций с целью устранения самопроизвольного изменения размеров деталей в условиях эксплуатации или длительного хранения. Рассмотрены пределы применимости и эффективности каждого из методов. Особое внимание уделено малоэнергоёмким и прогрессивным методам вибрационной правки. Выявлены проблемы технологии вибрационной правки деталей. В результате были сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

Во второй главе рассмотрены основные особенности технологического процесса изготовления фрикционных дисков, которые применяются в гидромеханических коробках переключения передач тяжелых грузовых автомобилей и тракторов, бортовых фрикционах гусеничных машин, тормозных

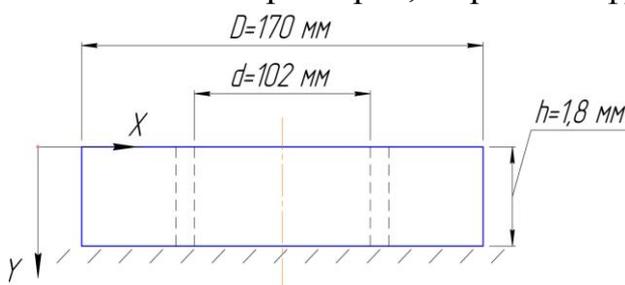


Рис.1 – Фрикционный диск № 45.077
заводской номенклатуры

устройствах и т.д. В соответствии с технологией изготовления деталей, заготовку получают методом вырубki из листа сталей марки 65Г, 30ХГСА, др. и подвергают термической обработке для получения твердости около 23...30 НРС. Протягивают эвольвентные шлицы и шлифуют рабочие поверхности. По окончании технологического процесса все фрикционные диски проходят контроль на соответствие заданным допускам на отклонение от плоскостности (Δ_n), которое не

должно превышать $0,1 \div 0,15$ мм в зависимости от типоразмера дисков. Если отклонение от плоскости дисков превышает заданные допуски, то детали подвергаются рихтовке.

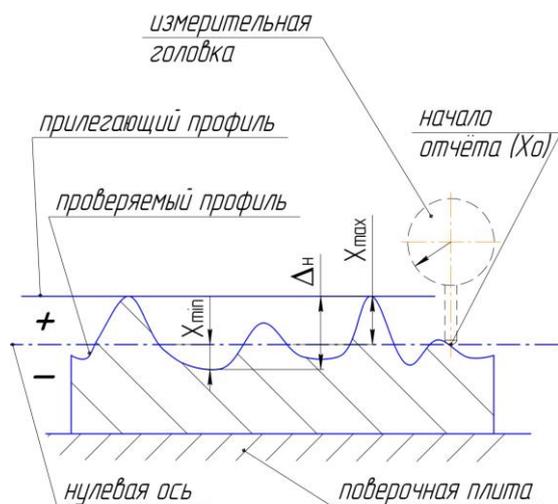


Рис.2 – Схема измерения отклонений от плоскости деталей

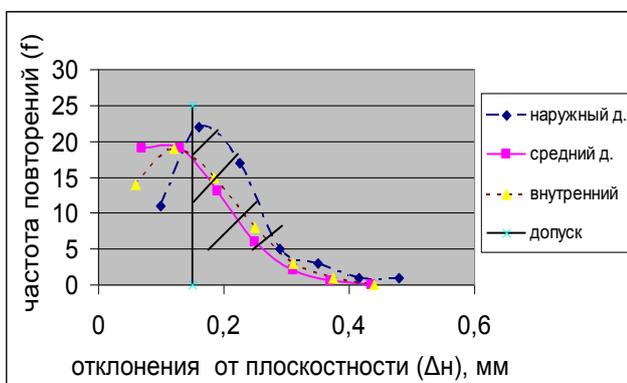


Рис.3 – Графики распределения отклонений от плоскости дисков по закону эксцентриситета для наружного, среднего и внутреннего диаметров

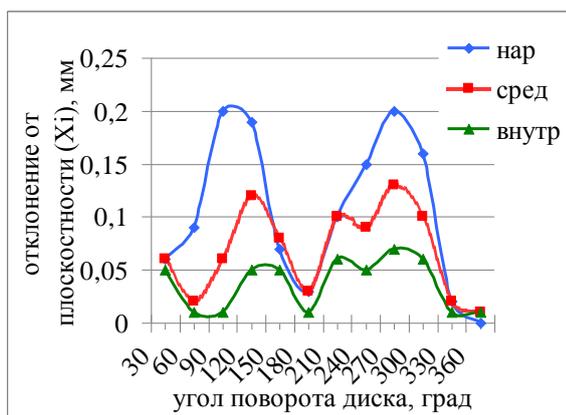


Рис.4 – Графики зависимости величин отклонений от плоскости по трём диаметрам от угла поворота диска

В главе исследован вопрос фактической точности изготовления выборки из 60 фрикционных дисков (рис.1), выпускаемых на УВЗ, после их хранения в течение нескольких месяцев. Измерения велись с помощью большого инструментального микроскопа и индикатора бокового действия (ИРБ 0,01 мм 0-0,8 ГОСТ 5584-61). Схема измерения отклонений от плоскостности дисков приведена на рис.2.

В результате проведённого статического анализа установлено, что:

- 1) около 50% дисков не укладываются в требуемый допуск в 0,15 мм (рис.3).
- 2) максимальный размах отклонений от плоскостности дисков достигает величины 0,51 мм.
- 3) преимущественным характером искажения геометрической формы дисков является «тарельчатость» с наложением волнообразной изогнутости на плоскость кольца с угловым шагом около 90 градусов (рис.4).
- 4) заключительные технологические операции рихтовки деталей вручную на плите и стабилизирующий отпуск их в штампе - малоэффективны.

В главе проведен анализ работ, посвященных исследованию технологической наследственности погрешности форм маложёстких деталей. На основании экспериментальных результатов В.Е. Антонюка по технологической наследственности фрикционных дисков сделан вывод о том, что наибольшие значения погрешности формы дисков наблюдаются после финишной операции

чистового шлифования. В результате было принято решение об изучении закономерностей тепловых явлений в зоне резания – поверхности контакта инструмента с деталью.

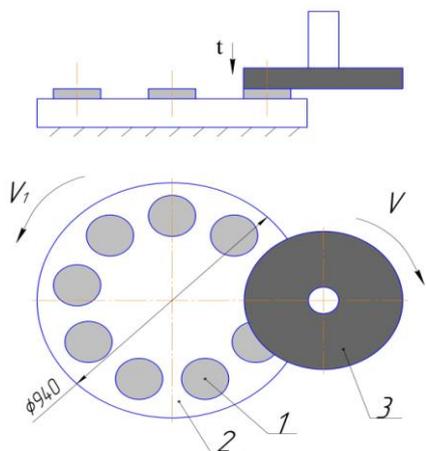


Рис.5 – Схема шлифования фрикционных дисков, 1 – диски, 2 – планшайба, 3 – абразивный инструмент V_1 - скорость детали V - скорость круга, t - вертикальная подача

При технологической операции плоского шлифования заготовок торцам круга на планшайбе (рис.5), в связи с конструктивными особенностями фрикционных дисков, на их поверхности возникают два участка с различными размерами контактной площадки зоны резания (рис. 6). Расчётно-аналитическим методом А.Н. Резникова найдено распределение температурных полей по сечению детали, а методом А.К. Цокура определены значения остаточных напряжений.

В результате проведённых исследований установлено, что малая термоустойчивость деталей и различная теплофизическая обстановка в их материале приводят к неравномерности поля остаточных напряжений, равно как и структурной неоднородности. На границах участков «структурной пестроты» возникают повышенные напряжения (рис.7). Релаксация и перераспределение

значительного уровня остаточных термических напряжений являются одной из причин самопроизвольного изменения геометрических размеров и форм маложёстких деталей типа дисков. Неоднородность остаточных напряжений вызывает образование определённого характера искажения геометрической формы дисков, а именно «двойной полуволны».

В третьей главе представлена теоретическое обоснование процесса

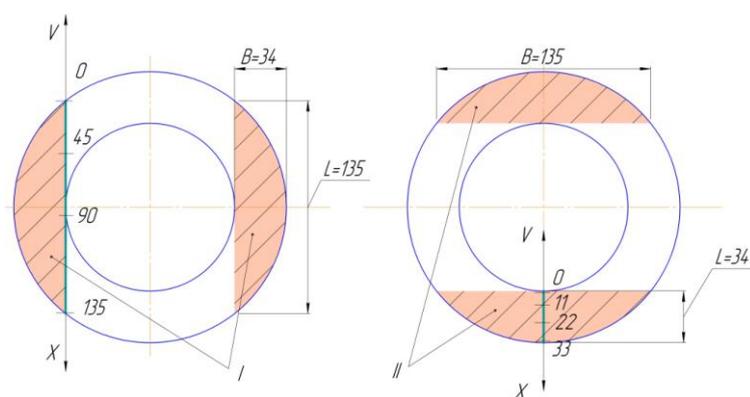


Рис.6 – Поверхность фрикционного диска с двумя различными контактными площадками зоны резания ($L \times B$)

релаксации остаточных напряжений в материале деталей при циклической деформации и на его основе разработана математическая модель вибрационной правки фрикционных дисков.

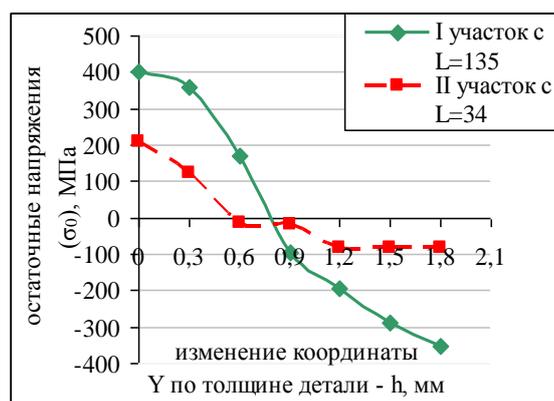


Рис.7 – Эпюры распределения максимальных остаточных напряжений по толщине диска, возникающих на границах двух участков

технологического процесса

Рассмотрены результаты современных исследований учёных по проблеме процессов релаксации напряжений, прочности и разрушению твёрдых тел. Особое внимание уделено кинетической концепции длительной прочности твёрдых тел, которая разработана академиком С.Н. Журковым и его учениками. На её основе автором диссертационной работы выдвинута гипотеза о связи времени релаксации с термомеханическими условиями нагружения при правке деталей. Кроме того, разработан новый способ вибрационной правки изделий, который заключается в следующем (рис.8). Предварительно измеряют геометрические отклонения детали от допускаемых значений, а именно значение деформации, угловой или линейный шаг волн деформации, идентифицируют эти отклонения, устанавливают изделие на опоры для создания обратного прогиба («заневоливания») и достижения напряжений изделия выше предела упругости. Далее подвергают механическим колебаниям деталь с частотой нагружения от 0,5 до 1,5 собственной частоты колебаний изделия, а также амплитудой колебания (A) от 0,1 до 0,2 величины созданного прогиба (Δ_c). Время наложения колебаний подбирается экспериментально из расчета $t_n = N/\omega$, где N – число циклов нагружения, соответствующее стадии циклической микротекучности ($N \leq 10^4$), ω – частота вынужденных колебаний.

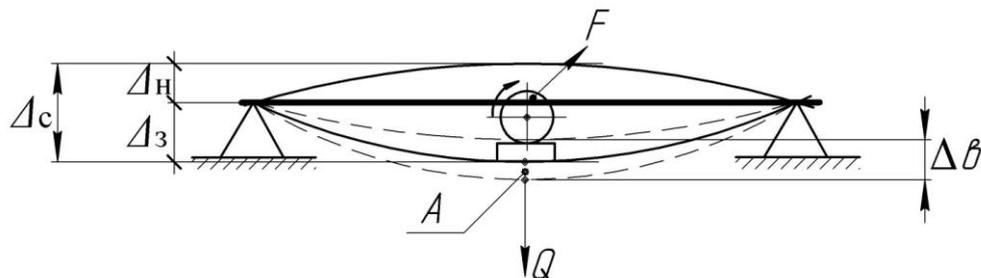


Рис. 8 – Схема вибрационной правки нежёстких деталей

Q – нагрузка статическая для создания Δ_c ; S – возмущающая сила для создания Δ_n ; A – амплитуда колебаний (наибольшая); Δ_n – начальный прогиб изделия, равный отклонению от правильной геометрической формы; Δ_z – величина перегиба изделия («заневоливания»); $\Delta_c = \Delta_n + \Delta_z$ – статическая деформация в результате наложения статической нагрузки Q

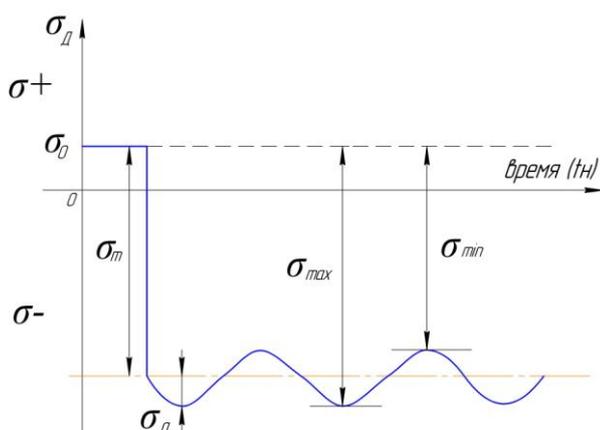


Рис.9 – Характер напряжений в процессе правки дисков

σ_d – амплитудное значение внешних напряжений, σ_m – среднее значение напряжений в цикле, соответствующее напряжению «заневоливания», σ_a – амплитудное значение напряжений в цикле, σ_{max} , σ_{min} – максимальное и минимальное значение напряжений, σ_0 – значение остаточных напряжений в материале

Совокупность указанных признаков в целом позволяет целенаправленно воздействовать на изогнутые участки деталей и создавать условия релаксации остаточных технологических напряжений при минимальном уровне энергетического воздействия, а также вести обработку на безопасных режимах, при которых не допускается потеря ресурса работы изделия. Характер нагружения соответствует одностороннему циклу (рис.9).

Разработка математической модели процесса виброправки маложёстких изделий заключалась в следующем. Для

плоских деталей (заготовок) схема изменения отклонений неплоскостности (Δ_n) от времени обработки представляется так – рис.10. График изменения Δ_n соответствует линии 1. Данный вид графика используется для создания расчётной модели процесса вибрационной правки.

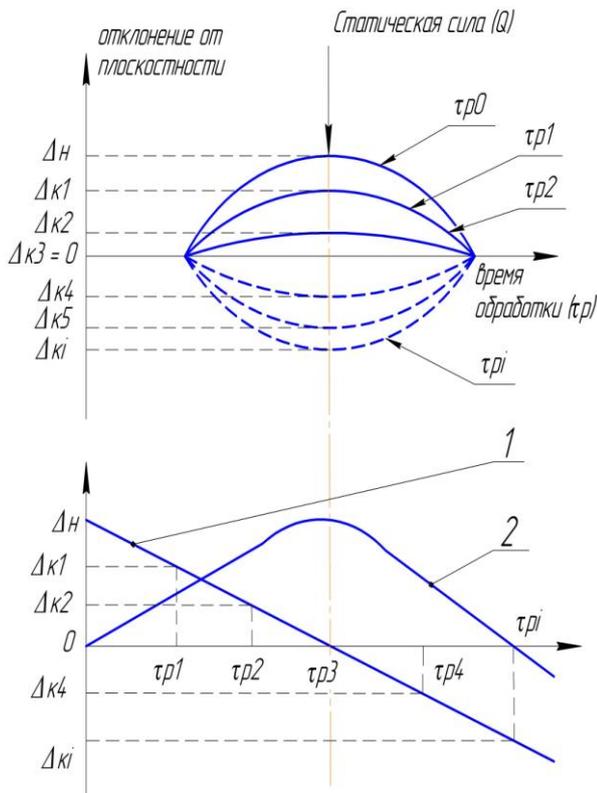


Рис.10 – Схема изменения величины неплоскостности деталей от времени релаксации остаточных напряжений (τ_p) в материале деталей

Δ_n – начальное значение перегиба деталей; $\Delta_{к1}$, $\Delta_{к2}$, $\Delta_{к3}$, ..., $\Delta_{ки}$ – величины отклонений, соответствующие времени правки τ_{p1} , τ_{p2} , τ_{p3} , ..., τ_{pi}

В.Е. Антонюк ввёл понятие как «исправляемость» (Δ) деталей, принимая её как разность величины начального (Δ_n) и конечного отклонения (Δ_k), т.е. $\Delta = \Delta_n - \Delta_k$. На рис.10 значение $\Delta_k > \Delta_n$ соответствует величине перегиба детали ($\Delta_{к4}$, ..., $\Delta_{ки}$). В этом случае график «исправляемости» выглядит в виде кривой – 2.

Уравнение прямой 1 (рис.10) в координатах $\Delta_n - \tau_p$ представляется как
$$\Delta_n = B - k \cdot \tau_p, \quad (1)$$
 где B и k – постоянные коэффициенты, τ_p – время релаксации остаточных напряжений.

С другой стороны, интенсивность необратимых процессов в материале изделия определяется скоростью рассеяния механической энергии и температуры. В качестве такого параметра предложен обобщённый параметр - \dot{S} , представляющий собой отношение мощности, поглощаемой

материалом механической энергии к абсолютной температуре, а по физическому смыслу \dot{S} соответствует скорости образования энтропии в процессе циклического нагружения образца:

$$\dot{S} = \frac{C \cdot \omega \cdot D \cdot A^2}{T}, \quad [\text{Вт/К}] \quad (2)$$

где C – жёсткость образца, Н/м; D – декремент свободных затухающих колебаний; T – температура испытаний, К.

В соответствии с положениями В.А. Степанова, автором диссертационной работы предлагается время процесса правки (время релаксации остаточных напряжений) экспоненциально связать с величиной обобщённого параметра \dot{S} , т.е.:

$$\ln \tau_p = \alpha - \beta_n \cdot \dot{S}, \quad (3)$$

где α и β_n – постоянные коэффициенты.

График зависимости (3) представляет прямую линию в координатах $\ln \tau_p - \dot{S}$.

Принимая во внимание то, что при достижении окончания правки $\Delta_k = 0$ (см. рис.10), время правки составит:

$$\tau_p = \frac{B}{k} = e^{[\alpha - \beta_{II} \cdot \frac{\omega \cdot D}{C \cdot T} \cdot (R \cdot \sigma_T \cdot \frac{\Delta_H}{\Delta_3})^2 \cdot \xi]} \quad (4)$$

где σ_T – предел текучести материала, Па; R – коэффициент $\approx 0,3 \div 0,6$; ξ – размерный коэффициент, m^2 .

Таким образом, величина перегиба диска при «заневоливание» составляет:

$$\Delta_3 = \Delta_H \cdot R \cdot \sigma_T \cdot W_x \cdot \sqrt{\frac{\omega \cdot D \cdot \beta_{II} \cdot l}{(\alpha - \ln(B) + \ln(k)) \cdot T \cdot E \cdot b \cdot h^3}}, [M] \quad (5)$$

где $b = D - d$, h – размеры сторон поперечного сечения образца, м (рис.1); l – расстояние между опорами балки, м; W_x – момент сопротивления поперечного сечения образца при изгибе, m^3 .

Уравнение (5) позволяет связать технологические параметры правки (температуру, частоту колебаний и т.д.) с геометрическими параметрами самих дисков (жесткостью, начальным прогибом диска и т.д.), что делает представленную математическую модель универсальной для всех типоразмеров фрикционных дисков.

В четвертой главе приводятся результаты экспериментальных исследований технологического процесса вибрационной стабилизации геометрических параметров и релаксации остаточных напряжений в материале фрикционных дисков.

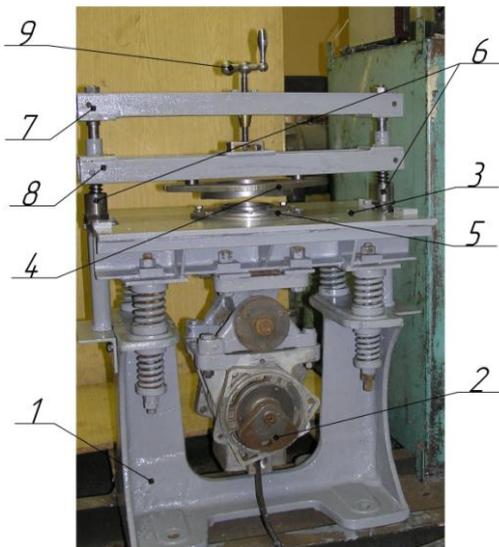


Рис.11 – Экспериментальная установка для виброправки фрикционных дисков (фото)

1 – корпус, 7 – верхняя траверса

С целью проведения исследований процесса правки фрикционных дисков (рис.1) была создана экспериментальная установка (рис.11). Диск для правки устанавливается на опорный фланец 5 таким образом, чтобы впадины на поверхности диска опирались на выступы. Поворачивая винт 9, осуществляется перемещение траверсы 8 с фланцем 4 вниз до того момента, как выступы фланца коснутся вершин выпуклостей диска. После этого, производится измерения высоты верхнего фланца до стола 3 с помощью штангенрейсмаса

ШР-250-0,05 для фиксации отметки начало отчёта, т.е. $\Delta_c = 0$. Затем, вновь поворачивается винт 9 для создания обратного перегиба выпуклостей диска до предела Δ_3 , при этом $\Delta_c = \Delta_H + \Delta_3$. Положение траверсы 8 фиксируется при помощи регулировочных гаек 6. Далее включается электромеханический вибратор 2 типа ИВ-20 ГОСТ 7124-62, колебания которого создают циклическую деформацию в материале диска с частотой 0,5 - 1,5 собственной частоты детали, которая определяется предварительно методом свободных затухающих

колебаний по ГОСТу 30630.1.1-99. Регулировка амплитуды колебаний осуществляется с помощью изменения положения дебалансов относительно друг друга. Регулирование частоты колебаний вибровозбудителя от 0-100 Гц осуществляется при помощи преобразователя частоты модели Toshiba VFS11- 4004 PL.

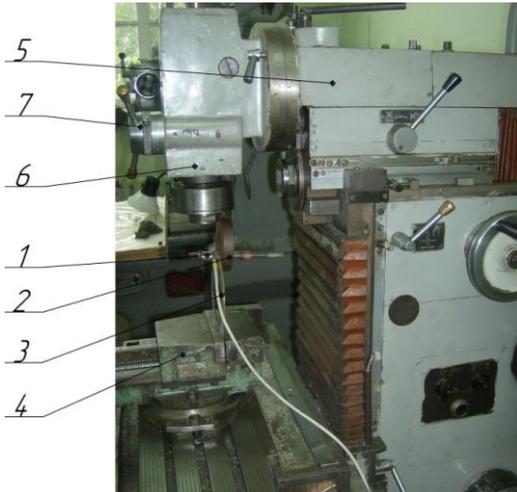


Рис.12 – Установка для записи кривой свободных затухающих колебаний дисков (фото),

1 – датчик вибрации ДН-3-М1,
2 – груз, 3 – образец, 4 – тисы, 5 – ползун,
6 – шпиндель, 7 – рукоятка



Рис.13 – Определение логарифмического декремента свободных затухающих колебаний

При оценке протекания релаксационных процессов при циклических деформациях процесса виброправки маложёстких изделий использовался метод измерения микротвёрдости материала, который осуществлялся на приборе ПМТ-3, а также метод внутреннего трения. Для измерения

внутреннего трения материала создана экспериментальная установка на базе фрезерного станка (рис.12). Метод внутреннего трения заключался в записи на цифровой осциллограф Тесконіх TDS3000 кривой свободных затухающих колебаний изделий (рис.13) и измерение логарифмического декремента по формуле:

$$D = \frac{1}{n} \cdot \ln \frac{A_t}{A_n} \quad (6)$$

где A_t – начальная амплитуда; A_n – конечная амплитуда; n – число полных колебаний.

В результате экспериментально установлено, что:

- 1) отношение σ_3/σ_0 при виброправке маложёстких деталей не должно превышать 10, т.е. $\sigma_3/\sigma_0 \leq 10$ (рис.14, табл.1).
- 2) количество циклов нагружения (N) для осуществления эффективного и безопасного процесса виброправки не должно выходить за $(1 \div 1,5) \cdot 10^4$ циклов, что соответствует стадии циклической микротекучести материала (рис.15). В противном случае процесс становится не управляемым. При этом, происходит накопление повреждений, которое может привести к перегибу деталей, а затем и к разрушению деталей.
- 3) в процессе виброправки деталей материал поглощает до 5 % энергии от общего количества энергии единичного цикла, что сопровождается увеличением декремента свободных затухающих колебаний с 0,03 до 0,06 ед. (рис.16), и свидетельствует о снижении остаточных напряжений.
- 4) при правке наблюдается разупрочнение материала – падение микротвёрдости на 16 %. Этот факт также косвенно свидетельствует о релаксации остаточных напряжений (рис.17).

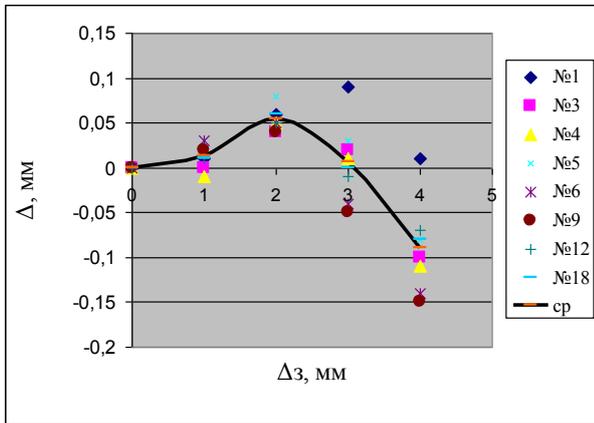


Рис.14 – Изменение величины «исправляемости» (Δ) дисков от величины «заневоливания» (Δ_3)

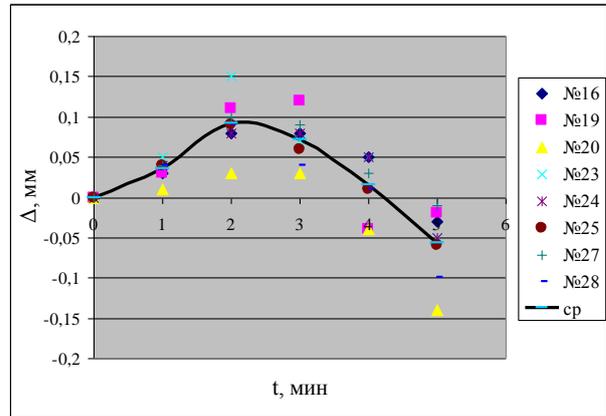


Рис.15 – Изменение величины «исправляемости» (Δ) фрикционных дисков от времени виброобработки - t

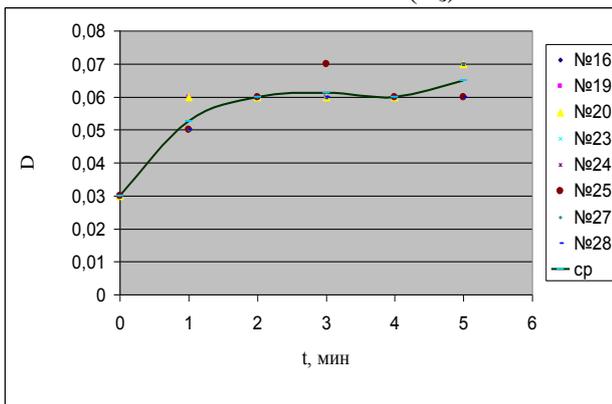


Рис.16 – Изменение декремента свободных затухающих колебаний (D) от времени виброобработки - t

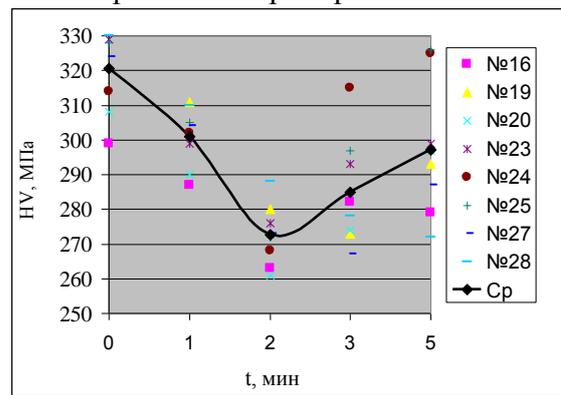


Рис.17 – Зависимость микротвёрдости (HV) материала деталей от времени их виброобработки

Для подтверждения правильности выводов п.4. проведены дополнительные опыты по исследованию зависимости микротвёрдости материала отожжённых образцов от времени циклического нагружения (рис.18-19).

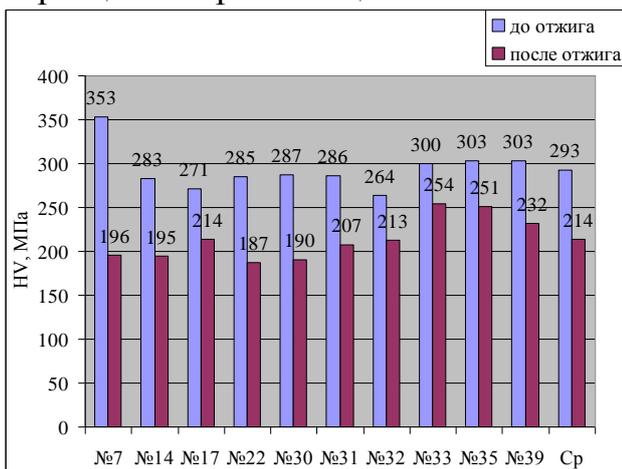


Рис.18 – Изменение микротвёрдости (HV) материала дисков до и после отжига

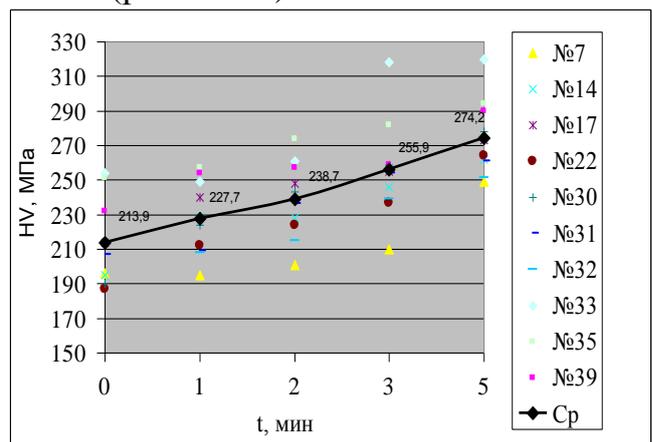


Рис.19 – Кинетика изменения микротвёрдости (HV) отожженных деталей от времени циклического деформирования - t

На основании экспериментальных данных получены коэффициенты уравнений (1), (3) и рассчитаны значения перегиба фрикционных дисков (Δ_3) для различных типоразмеров в зависимости отклонения от плоскостности (Δ_n) (табл.1). Кроме того, автором работы выполнен анализ поведения отношения

Δ_3/Δ_H от изменения технологических параметров процесса правки (частоты колебаний, температуры) на основе математического моделирования.

Табл. 1 – Величина перегиба (Δ_3) различных дисков в зависимости от Δ_H

№	Геометрические параметры диска			b, мм	l, мм	$\Delta_3, \text{мм}$			
	D, мм	d, мм	h, мм			$\Delta_H, \text{мм}$			
						0,2	0,3	0,4	0,5
1	238h13	170 ^{+0.63}	1.8 _{-0.12}	68	320	3,4	5,1	6,8	8,5
2	170h13	102 ^{+0.23}	1.8 _{-0.12}	68	214	2,7	4	5,5	7
3	218h14	158H11	1.8 _{-0.12}	60	295	3,1	4,6	6,1	7,6
4	125	78H11	1.8	47	159	2	3	4	5
5	497 ± 0.2	438 ^{+0.38}	4 ± 0.03	59	734	7,1	11	14	18
6	507 _{-0.45}	449 ± 0.2	4 ± 0.03	58	751	7,1	11	14	18
7	400 ± 0.2	348 ^{+0.34}	3.5 ± 0.03	52	587	5,6	8,4	11	14
8	417 _{-0.38}	359 ± 0.2	3.5 ± 0.03	58	609	6	9	12	15

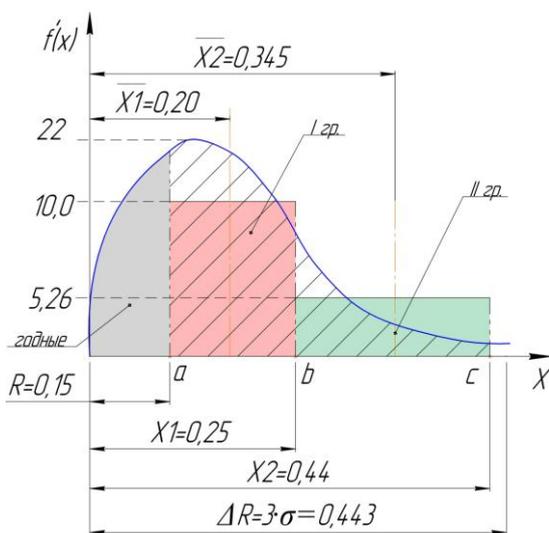


Рис.20 - Схема разделения деталей на группы согласно распределению погрешностей неплоскостности дисков

R – величина допуска, X – величина прогиба дисков

Проверка адекватности математической модели показала, что расхождение расчётных и экспериментальных данных находятся в пределах погрешности опыта. Уровень коэффициента корреляции равен 0,973.

Для осуществления автоматизированного контроля отклонения дисков от плоскостности и последующей правки на промышленном оборудовании вся совокупность дисков, превышающих допуск отклонения от плоскостности, разделили на отдельные группы I и II (рис.20).

В пятой главе представлен разработанный РТК контроля и вибрационной правки маложёстких деталей типа дисков (рис.21). В управляющей программе РТК реализован следующий алгоритм. В начале оператором 1 загружаются диски в общий накопитель 11.

На установке 7 происходит измерение и последующее разделение деталей на годные и брак. Брак сортируется промышленным роботом (ПР) 6 на группы I и II (накопители 9 и 10). После сортировки всех дисков, каждая перемещается ПР на установку 5, где происходит их правка. В конце все изделия проходят повторный контроль геометрических параметров.

В главе приведены промышленные конструкции установок для измерения и правки, а также структурные, функциональные, принципиальные схемы. Даны рекомендации по выбору стандартного оборудования (ПР, микроконтроллера и др.).

Автором диссертационной работы создан алгоритм работы РТК. На его основе в графической среде программирования LabVIEW разработана

программа, которая представляет собой виртуальный прибор – пульт оператора (рис.22). С помощью виртуального прибора можно быстро и оперативно задавать режимные параметры для правки первой и второй группы, а именно частоту вынужденных колебаний, температуру, время процесса, а затем получать информацию о величине «заневоливания» для каждого типоразмера дисков заводской номенклатуры.

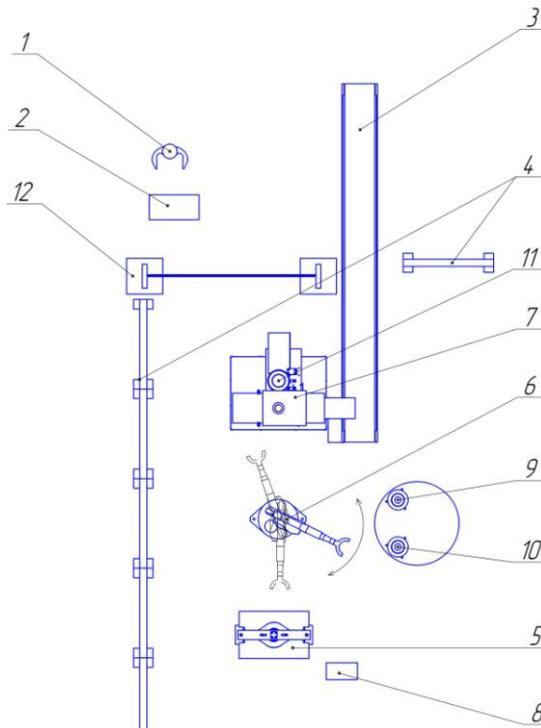


Рис.21 - Компоновка РТК для виброправки маложёстких деталей

1 – оператор; 2 – устройства управления; 3 – ленточный конвейер; 4 – пассивные ограждения; 5 – установка для виброправки; 6 – промышленный робот; 7 – установка для измерения и контроля качества деталей; 8 – система подготовки воздуха; 9 – накопитель для I группы деталей; 10 – накопитель для II группы деталей; 11 – общий накопитель (начальная точка); 12 – активное ограждение

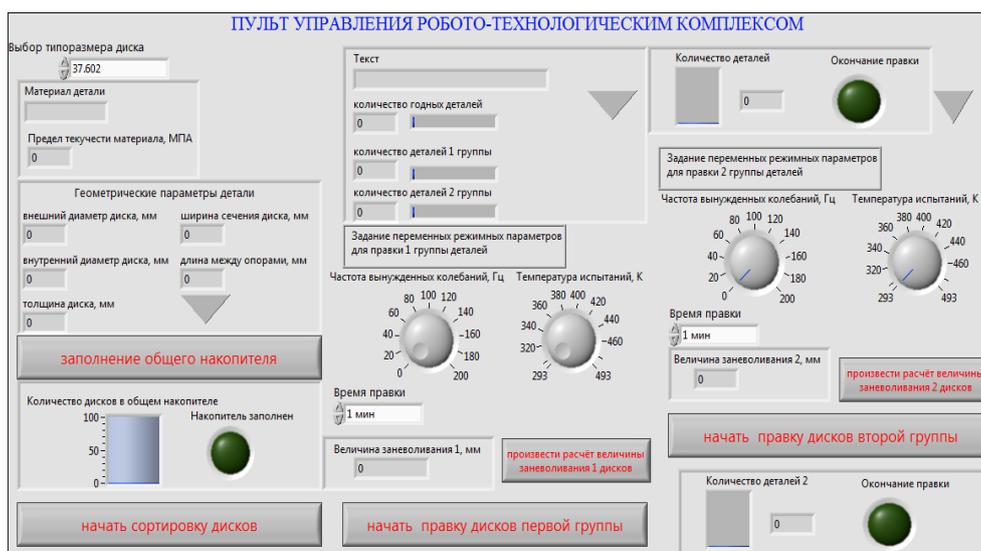


Рис.22 – Программа работы и управления РТК (виртуальный прибор)

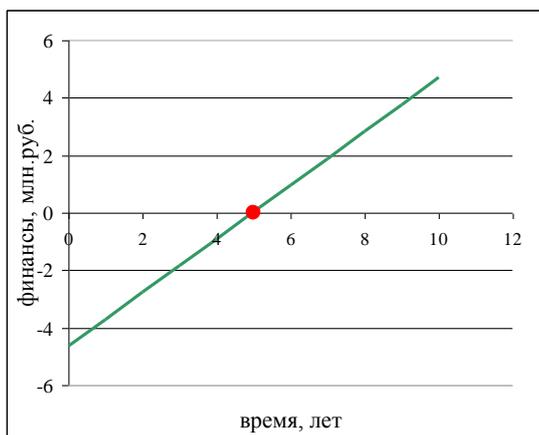


Рис.23 - Экономическая эффективность проекта

В заключении рассмотрены технико-экономические показатели внедрения РТК на машиностроительные предприятия при замене ручного труда (рис. 23).

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ.

1. В работе осуществлён комплексный подход к созданию метода повышения геометрической точности и стабилизации формы маложёстких деталей на основе анализа природы возникающих остаточных технологических напряжений, теоретического и экспериментального изучения закономерностей их релаксации под действием циклической деформации (вибрации).

2. Статистический анализ погрешностей геометрической формы (отклонение от плоскостности) выявил значительные отклонения от допусков. Доля дисков, с превышением допуска 0,15 мм, составляет 50% от общего выпуска.

3. Расчётно-аналитическими методами установлено, что причиной возникновения погрешностей формы являются высокие градиенты температур по сечению фрикционного диска с наложением перепадов температур в различных частях деталей в процессе шлифования дисков на поворотном столе плоскошлифовального станка. Диапазон колебания остаточных напряжений составит от 400 МПа до -350 МПа.

4. На основе анализа существующих методов холодной правки маложёстких изделий сделан вывод, что наиболее перспективным с точки зрения энергоёмкости процесса стабилизации геометрических параметров дисков, возможности обеспечения контроля процесса и регулирования режимов, является метод вибрационной правки.

5. На основе изучения релаксационных процессов, лежащих в основе снижения остаточных технологических напряжений, впервые предложена модель вибрационной правки, построенная на кинетических закономерностях релаксации напряжений при пластической деформации в условиях циклического нагружения материала. Введено понятие обобщённого параметра - \dot{S} , по физическому смыслу, представляющего скорость образования энтропии в процессе циклического нагружения детали.

Время процесса правки (время релаксации остаточных напряжений) экспоненциально связано с величиной обобщённого параметра - \dot{S} . Указанный параметр характеризует мощность рассеяния (диссипации) энергии циклических колебаний в материале, часть которой идёт на релаксацию остаточных

напряжений (по механизму микропластической деформации). В то же время, элементы \dot{S} такие, как C , частота – ω , амплитуда – A , температура – T , являются технологическими параметрами процесса правки.

6. Для маложёстких изделий установлены ограничения параметров вибрационного воздействия по соотношению амплитуды колебаний A и деформации изделия от статической силы (Δ_c) в условиях резонансных и околорезонансных частот. Это соотношение составляет $A/\Delta_c = 0,1 \div 0,2$. При таком соотношении обеспечивается безопасный уровень изгибных напряжений в материале изделия.

Данное техническое решение признано изобретением.

7. В соответствии с результатами теоретических и экспериментальных исследований предложена математическая модель для расчёта основных технологических характеристик процесса вибрационной правки. Предложенная модель позволяет рассчитать величину перегиба деталей или «заневоливания» (Δ_3) при известных значениях погрешностей формы (Δ_n), время обработки (число циклов) для различных типоразмеров дисков.

8. Для изучения и обоснования достоверности выдвинутых теоретических положений, а также раскрытия особенностей механизма релаксации напряжений в нагруженном образце разработана методика экспериментальных исследований и экспериментальная установка. Достоверность теоретических положений отмеченных в п.п 4 и 5 подтверждена результатами измерения микротвёрдости материала изделия и величины изменения внутреннего трения.

Процесс вибрационной правки деталей из стали 65Г сопровождается увеличением декремента свободных затухающих колебаний (до двух-трёх раз) и снижением микротвёрдости на 12-16%, что свидетельствует о релаксации (снижении) остаточных технологических напряжений. Число циклов нагружения деталей не должно превышать $(1 \div 1,5) \cdot 10^4$ циклов.

9. Малоэнергоёмкий способ виброправки позволяет снижать отклонение формы деталей более, чем на 60%. Эффективность технологии виброправки маложёстких деталей подтверждается высокой размерной стабильностью изделий в течении 1000 часов, что свидетельствует о стабилизации структурно-энергетического состояния материала деталей.

10. Для практической реализации технологии вибрационной правки маложёстких деталей типа дисков разработан РТК. Экономический эффект от внедрения технологии вибрационной правки дисков составляет около 1 млн. руб. ежегодно.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

В рецензируемых изданиях, входящих в перечень ВАК РФ:

1. **Гупалов, Б.А.** Анализ причин потери геометрической точности фрикционных дисков / Б. А. Гупалов, В. В. Закураев // Омский научный вестник. – 2012. – №3 (113). – С. 146-150. - ISSN 1813-8225.
2. **Патент 2484910 Российская Федерация, МПК В 21 D 1/06.** Способ вибрационной правки маложёстких деталей / Бучнев Ю.Г., Гупалов Б.А., Закураев В.В.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО НИЯУ

«МИФИ» , ОАО «НПК «Уралвагонзавод» им. Ф.Э. Дзержинского. - № 2010145692/02 ; заявл. 09.11.2010 ; опублик. 20.06.2013, Бюл. № 17. – 8 с. : ил.

3. **Гупалов, Б.А.** Технология и оборудование вибрационной правки фрикционных дисков / Б. А. Гупалов // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2013. – № 9(80). – С. 44-50. - ISSN 1814-3520.

В других научных изданиях:

4. **Гупалов, Б.А.** Анализ возможности создания способа вибрационной правки деталей типа дисков / Б.А. Гупалов, В.В. Закураев // Дни науки 2011. Ядерно-промышленный комплекс Урала : сборник докладов IX научно-практической конференции. В 2т. Т.2. – Озёрск : ОТИ НИЯУ «МИФИ», ФГУП «ПО «МАЯК», 2011. - С. 31-33.
5. **Гупалов, Б.А.** Кинетика изменения геометрических параметров фрикционных дисков при вибрационной обработке [Электронный ресурс] / Б.А. Гупалов, В.В. Закураев // Вестник науки Сибири. – 2011. – №1(1). – С.682-685. – Режим доступа : <http://sjs.tpu.ru/journal/article/view/131>.
6. **Гупалов, Б.А.** Установка и результаты вибрационной правки фрикционных дисков / Б.А. Гупалов // Транспорт XXI века: исследования, инновации, инфраструктура: материалы научно-технической конференции [посв. 55-летию УрГУПС]. - Екатеринбург, 2011. - Вып. 97(180). - С.711 – 719.
7. **Гупалов, Б.А.** Рассеивание энергии в материале при вибростабилизации фрикционных дисков / Б.А. Гупалов // XXIII Международная инновационно-ориентированная конференция молодых ученых и студентов (МИКМУС - 2011): материалы конференции (Москва, 14-17 декабря 2011 г.). - М. : Изд-во ИМАШ РАН, 2011. – С. 259.
8. **Гупалов, Б.А.** Определение и оценка микротвёрдости материала после вибростабилизации фрикционных дисков / Б.А. Гупалов // Инновации в машиностроении: сборник трудов международной молодёжной конференции. – Томск: Изд-во ТПУ, 2012. – С. 84-87.
9. **Гупалов, Б.А.** Физические основы стабилизации (правки) геометрических параметров деталей машин / Б.А. Гупалов // Труды II научно-практической конференции студентов и аспирантов НТИ НИЯУ МИФИ (27 апреля 2012 г.), – Новоуральск: Изд-во НТИ НИЯУ МИФИ, 2012. – С. 43-47. - ISBN 5-332-00031-6.
10. **Гупалов, Б.А.** Разработка математической модели процесса вибрационной правки деталей машин / Б.А. Гупалов, В.В. Закураев. // Фундаментальные и прикладные проблемы науки. В 4т. Т.2. : материалы VII международного симпозиума.– М. : РАН, 2012. – С. 55 – 62.
11. **Гупалов, Б.А.** Разработка технологии и исследования процесса вибрационной правки фрикционных дисков / Б.А. Гупалов // Автоматизация и прогрессивные технологии в атомной отрасли: труды VI международной научно-технической конференции (15-19 октября 2012 г.). - Новоуральск: Изд-во Форт-Диалог, 2012. – С. 279-282.
12. **Гупалов, Б.А.** Разработка экспериментальной установки для исследования процесса вибрационной правки деталей / Б.А. Гупалов, М.В. Айзаров //

Автоматизация и прогрессивные технологии в атомной отрасли: труды VI междунар. науч.-техн. конф. (15-19 октября 2012 г.). – Новоуральск : Изд-во Форт-Диалог, 2012. – С. 291-294. - ISBN 5-332-00033-8.

Гупалов Борис Алексеевич

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ВИБРАЦИОННОЙ
ПРАВКИ МАЛОЖЁСТКИХ ДЕТАЛЕЙ ТИПА ДИСКОВ

Специальность 05.02.08 «Технология машиностроения»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени кандидата технических
наук

Подписано в печать 16.09.2013. Формат А5. Тираж 100 экз.

Заказ 1298.

Отпечатано в типографии «НИЗКИХ ЦЕН», 454046, г. Челябинск, ул.
Гагарина, 51.