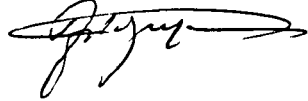


На правах рукописи



Горгоц Владимир Георгиевич

**ДИНАМИЧЕСКАЯ СТАБИЛИЗАЦИЯ
ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОГО ОТДЕЛОЧНОГО
ВЫГЛАЖИВАНИЯ ДЛЯ МНОГОЦЕЛЕВОЙ ОБРАБОТКИ
ШПИНДЕЛЕЙ И ШТОКОВ ТРУБОПРОВОДНОЙ АРМАТУРЫ**

Специальность 05.03.01 – «Технологии и оборудование
механической и физико-технической обработки»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Курган-2008

Работа выполнена в ГОУ ВПО
Курганский государственный университет

Научный руководитель	почетный работник ВПО РФ, кандидат технических наук, доцент Кузнецов Виктор Павлович
Официальные оппоненты:	почетный работник ВПО РФ, доктор технических наук, профессор Мазеин Петр Германович; кандидат технических наук, доцент Некрасов Юрий Иннокентьевич
Ведущее предприятие	ОАО «АК «Корвет» (г. Курган)

Защита состоится «12» 12. 2008 в 15ч. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.273.09 при Тюменском государственном нефтегазовом университете по адресу: 625000, г.Тюмень, ул. Володарского, 38, зал имени А.Н. Косухина.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Тюменского государственного нефтегазового университета.

Авторсферат разослан «3» ноября 2008 года.

Учёный секретарь
диссертационного совета
д.т.н., профессор



Ю.Г. Сысоев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Достижение эксплуатационных свойств трубопроводной арматуры (ТПА) высокого давления в значительной мере связано с обеспечением параметров качества уплотнительных поверхностей деталей. На заводах трубопроводной арматуры и ремонтных предприятиях в качестве финишной операции при производстве шпинделей и штоков запорной арматуры применяют малопроизводительную доводку на притирочных станках или полировку. В настоящее время для финишной обработки поверхностей деталей наметилась тенденция использования методов поверхностного пластического деформирования (ППД) на станках с ЧПУ и, в частности, алмазного выглаживания.

В высокотехнологичном машиностроении возрастает применение многооперационных центров с ЧПУ, позволяющих выполнять многоцелевую обработку сложных и ответственных деталей за один установ. Для реализации многоцелевой обработки шпинделей и штоков на станках с ЧПУ необходимо создать быстросменный инструмент для высокопроизводительного отделочного выглаживания уплотнительных поверхностей. В настоящее время отсутствуют теоретические подходы и практика создания быстросменного инструмента, обеспечивающего динамическую стабильность высокопроизводительного выглаживания и, соответственно, обеспечения требуемого качества ответственных поверхностей деталей. Таким образом, динамическая стабилизация высокопроизводительного выглаживания уплотнительных поверхностей при многоцелевой обработке шпинделей и штоков, представляет собой актуальную проблему, решение которой представляет научный, и практический интерес.

Данными обстоятельствами обусловлена цель работы: динамическая стабилизация процесса высокопроизводительного отделочного выглаживания уплотнительных поверхностей на основе создания специального инструмента для реализации обработки шпинделей и штоков трубопроводной арматуры высокого давления на токарно-фрезерных центрах за один установ.

Для осуществления цели в работе поставлены следующие задачи:

1. Разработать теоретическую нелинейно-динамическую модель упругого выглаживания поверхностей деталей на токарно-фрезерном центре.
2. Исследовать методами фазового портрета и имитационного моделирования условия перехода от автоколебательного к устойчивому процессу взаимодействия индентора с поверхностью обрабатываемой детали и определить влияние параметров упругодемпфирующих элементов инструмента на динамическую стабилизацию процесса.
3. Создать экспериментальную установку и провести исследования упругодемпфирующих свойств элементов конструкции инструмента для обеспечения виброустойчивости (отсутствия автоколебаний) нелинейно-динамического процесса выглаживания.
4. Разработать быстросменный инструмент со встроенным узлом динамической стабилизации (УДС) для высокопроизводительного отделочного выглаживания уплотнительных поверхностей шпинделей и штоков ТПА из нержавеющей сталей при многоцелевой обработке.

5. Разработать инженерную методику настройки натяга упругодемпфирующего элемента УДС быстросменного инструмента (силы выглаживания) для обеспечения требуемого уровня шероховатости поверхности детали при высокопроизводительной отделочной обработке на токарно-фрезерном центре.

Методы и средства исследования. В теоретическом исследовании использовались методы теории колебаний, теории нелинейной динамики систем, теории упругости и пластичности, имитационного моделирования в проблемно-ориентированном пакете Vissim 5. Экспериментальные исследования узлов динамической стабилизации разработанного инструмента проводились на специальной установке, основанной на методах триботехники. Практическая реализация высокопроизводительного отделочного выглаживания выполнена на многоцелевых токарно-фрезерных центрах MULTUS B-300W и ES-L8II-M, (OKUMA, Japan). Для измерения параметров шероховатости применялся компьютеризированный профилограф-профилометр 170623 (ОАО «Калибр»).

Научная новизна:

1. Разработана математическая модель нелинейной динамики процесса упругого выглаживания поверхностей тел вращения на динамически жёстком станке, в основу построения которой положено:
 - представление динамической системы в виде нелинейно-динамического ядра (НДЯ), нелинейные параметры которого и предопределяют возможность автоколебательного движения индентора инструмента;
 - описание цикла колебаний индентора при выглаживании поверхности четырьмя участками движения (фазами) посредством кусочно-линейной аппроксимации;
 - гистерезисный характер изменения высоты валика в контакте «индентор-обрабатываемая поверхность»;
 - разрывной вид зависимостей силы сухого трения в упругодемпфирующих элементах инструмента и жёсткости контакта индентора с поверхностью.
2. Установлена зависимость критической скорости выглаживания от изменения высоты валика деформированного металла, радиуса заточки и виброскорости индентора и позволившая определить границу динамической стабилизации процесса (переход от автоколебательного к динамически устойчивому упругому выглаживанию).
3. Создан многолистный фазовый портрет нелинейной динамики упругого выглаживания, позволивший имитационным моделированием установить влияние параметров нелинейно-динамического ядра (НДЯ) на виброустойчивость процесса и определить границы изменения параметров упругодемпфирующих элементов и массы индентора инструмента.
4. Научно обоснован синтез встроенного УДС выглаживающего инструмента на основе двухуровневого управления энергетикой колебательного движения индентора, соответственно:
 - диссипацией накопленной энергии полого индентора упругодемпфирующими элементами специальной конструкции (конструкционный уровень)

- снижением притока энергии за счёт изменения механики контактного взаимодействия формой заточки рабочей части индентора (технологический уровень).

Практическая ценность:

1. Разработана программная реализация в пакете Vissim 5 математической модели нелинейной динамики упругого выглаживания для имитационного моделирования влияния широкого спектра изменения параметров модели на виброустойчивость процесса без дорогостоящих и длительных экспериментальных исследований.
2. Создан и запатентован быстросменный инструмент с узлом динамической стабилизации (патенты Р.Ф. № 62554, 70176) для высокопроизводительного отделочного выглаживания уплотнительных поверхностей деталей из нержавеющей стали.
3. Разработана инженерная методика определения оптимального натяга упругодемпфирующего элемента УДС быстросменного выглаживателя (обеспечение силы выглаживания) по критерию требуемой величины шероховатости обрабатываемой поверхности.
4. Применение быстросменного инструмента с узлом динамической стабилизации обеспечило высокопроизводительное отделочное выглаживание уплотнительных поверхностей штоков и шпинделей с шероховатостью $Ra=0.03-0.15$ мкм со скоростью до 300 м/мин и подачи до 0,3 мм/об при многоцелевой обработке.

Область применения результатов. Разработанную математическую модель можно использовать для параметрического проектирования новых конструкций инструмента. Созданный инструмент с узлом динамической стабилизации может быть применен при высокопроизводительном отделочном выглаживании деталей из нержавеющей сталей 20Х13; 30Х13; 14Х17Н2 и т. п.

Реализация полученных результатов:

1. Результаты выполненной работы внедрены на ОАО «АК «Корвет» (г. Курган), ЗАО «Нижевартовскремсервис» (г. Нижневартовск), ООО «Предприятие «Сенсор» (г. Курган).
2. Основополагающие материалы диссертации легли в основу изданного при участии автора учебного пособия, допущенного Учебно-методическим объединением вузов по образованию в области автоматизированного машиностроения (УМО АМ) для студентов вузов.

Апробация работы. Основные положения работы докладывались и обсуждались на: научных семинарах кафедры «Автоматизация производственных процессов» Курганского государственного университета с 1990 по 2008 гг.; международной научно – технической конференции «Современные проблемы машиностроения» в г. Томске, 2006 г.; международной научно – технической конференции «Новые машины и технологии для ремонта магистральных трубопроводов» в г. Кургане, 2006 г.; межкафедральном научном семинаре в Курганском государственном университете, 2007 г.; объединенном научно-техническом семинаре в Тюменском государственном нефтегазовом университете, 2007 г.; IX международной научно-технической конференции «Кибернетика и высокие технологии XXI века» в г. Воронеж 2008 г.

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 14 печатных работ, включая 2 статьи в центральных журналах (список ВАК РФ), 6 патентов РФ на полезную модель.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, основных выводов, списка использованных источников и приложений.

Работа содержит 121 страницу печатного текста, 71 рисунок.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дается общая характеристика работы, обосновывается ее актуальность, научная новизна, практическая ценность.

В первой главе выполнен анализ современного состояния исследований в области технологий финишной обработки уплотнительных поверхностей деталей ТПА, отделочной обработки деталей методами ППД на металлорежущих станках, виброустойчивости упругого алмазного выглаживания и моделирования динамики нелинейных станочных систем, основываясь на научных работах А.М. Дальского, А.Г. Сулова, Д.Д. Папшева, Л.Г. Одинцова, М.М. Жасимова, В.М. Торбило, Ю.Г. Шнейдера, В.М. Смелянского, Л.А. Хворостухина, П.Г. Мазина, С.В. Сейнова, В.А. Кудинова, Ю.Г. Кабалдина, В.Л. Заковоротного, Г.С. Лазарева, Б.М. Бржозовского и других авторов. Дан краткий анализ рассмотренных работ и на основании литературного обзора сформулированы цель и задачи исследования.

Во второй главе на основе теоретических подходов развитых в трудах М.Е. Эльясберга, В.А. Кудинова, Л.С. Мурашкина, Ю.Г. Кабалдина и др. разработана расчётная схема динамической системы упругого выглаживания поверхностей тел вращения (рис 1).

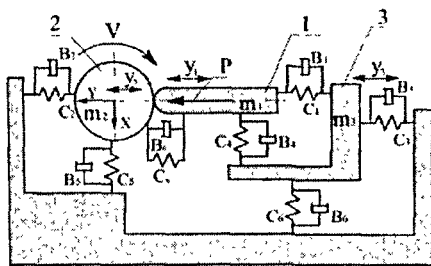


Рис. 1. Схема динамической системы упругого выглаживания поверхностей тел вращения:

1 – индентор выглаживателя; 2 – обрабатываемая деталь; 3 – суппорт станка; m_1, m_2, m_3 – приведённые массы соответственно: индентора, обрабатываемой детали, суппорта станка; C_0, C_1, C_2, C_3 – коэффициенты приведённой жесткости по оси Y соответственно: контакта «индентор–обрабатываемая деталь», упругих элементов выглаживателя, обрабатываемой детали, упругих элементов суппорта; C_4, C_5, C_6 – коэффициенты приведённой жесткости по оси X, соответственно: упругих элементов выглаживателя, обрабатываемой детали, упругих элементов суппорта; V_0, V_1, V_2, V_3 – приведённые коэффициенты вязкого трения по оси Y, соответственно: в контакте «индентор–обрабатываемая деталь», в элементах выглаживателя, детали, элементах суппорта; V_4, V_5, V_6 – коэффициенты вязкого трения по оси X, соответственно: в элементах выглаживателя, в детали, в элементах суппорта; P – усилие выглаживания, V – скорость выглаживания.

Колебательные движения индентора инструмента y_1 , обрабатываемой детали y_2 и суппорта y_3 в динамической системе упругого выглаживания описаны дифференциальными уравнениями (1-3).

$$m_1 \frac{d^2 y_1}{dt^2} + B_1 \frac{dy_1}{dt} + C_0 (y_1 - y_2) = C_1 (y_3 - y_1) + B_1 \left(\frac{dy_3}{dt} - \frac{dy_1}{dt} \right) - P, \quad (1)$$

$$m_2 \frac{d^2 y_2}{dt^2} + B_2 \frac{dy_2}{dt} + C_2 y_2 = C_0 (y_1 - y_2) + B_0 \left(\frac{dy_1}{dt} - \frac{dy_2}{dt} \right) + P, \quad (2)$$

$$m_3 \frac{d^2 y_3}{dt^2} + B_3 \frac{dy_3}{dt} + C_3 \frac{dy_3}{dt} = - \left[C_1 (y_3 - y_1) + B_1 \left(\frac{dy_3}{dt} - \frac{dy_1}{dt} \right) \right]. \quad (3)$$

При обработке деталей на динамически жёстком токарно-фрезерном центре в схеме динамической системы упругого выглаживания поверхностей (рис. 1) предложено выделить нелинейно-динамическое ядро (НДЯ), нелинейные параметры которого C_0 , h_b , $F_{тр}$ (рис. 2а) и предопределяют возможность возникновения автоколебательного процесса движения индентора инструмента.

Цикл колебательного движения индентора инструмента в процессе упругого выглаживания представлен следующими участками (фазами) движения, (рис. 2б): 1 - вход в обрабатываемую поверхность, 2 - выход из обрабатываемой поверхности, 3 - движение от обрабатываемой поверхности, 4 - движение к обрабатываемой поверхности.

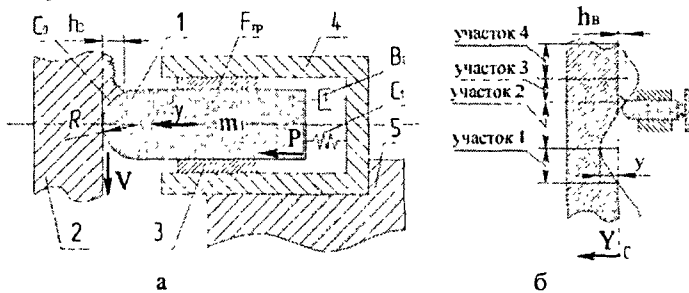


Рис. 2. Схема нелинейно-динамического ядра (НДЯ) процесса упругого выглаживания типовым инструментом на динамически жёстком станке:

1-индентор, 2 – обрабатываемая поверхность, 3 – упругодемпфирующий элемент, 4- корпус выглаживателя, 5 – суппорт станка, R- радиус индентора, m_1 – масса индентора, $F_{тр}$ – сила трения в направляющих индентора, h_b – высота валика пластически деформируемого материала детали.

Математическая модель нелинейной динамики процесса упругого выглаживания, в соответствии со схемами (рис. 2), представлена следующими дифференциальными уравнениями:

для 1 участка: $m_1 \frac{d^2 y}{dt^2} + B_1 \frac{dy}{dt} + C_{0_{вх}} \cdot y = P - F_{тр}$ при $y > 0$, $\frac{dy}{dt} > 0$; (4)

для 2 участка: $m_1 \frac{d^2 y}{dt^2} + B_1 \frac{dy}{dt} + C_{0_{вых}} \cdot y = P + F_{тр}$ при $\Delta y > y > h_b$, $\frac{dy}{dt} < 0$; (5)

для 3 участка: $m_1 \frac{d^2 y}{dt^2} + B_1 \frac{dy}{dt} = P + F_{тр}$ при $y < h_a$, $\frac{dy}{dt} < 0$; (6)

для 4 участка: $m_1 \frac{d^2 y}{dt^2} + B_1 \frac{dy}{dt} = P - F_{тр}$ при $y < 0$, $\frac{dy}{dt} > 0$, (7)

где $C_{0вх}$, $C_{0вых}$ – коэффициенты жесткости контакта «индентор - обрабатываемая поверхность», соответственно на участках 1, 2.

На участке 1 происходит вход индентора в поверхность металла с вытеснением валика высотой $h_a = k_2 y$. На участке 2 индентор скользит по поверхности сформированного валика рис. 3а.

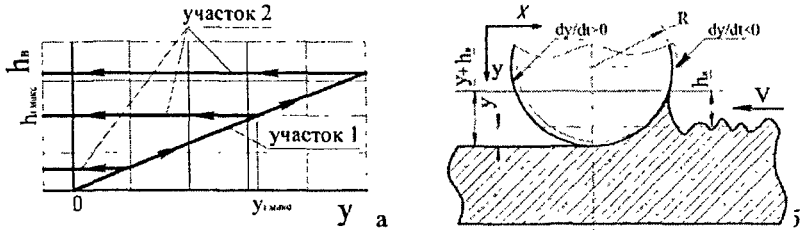


Рис. 3. Схемы к определению зависимостей коэффициента контактной жесткости C_0 (а): и критической скорости выглаживания $V_{кр}$ (б) от изменения высоты валика h_a

Характер гистерезисной нелинейной зависимости C_0 приводит к необходимости её описания двумя формулами:

$$C_{0вх} = k_1 \cdot \pi^2 \cdot R \cdot y \cdot (1 + k_2) HB \quad (8)$$

$$C_{0вых} = k_1 \cdot \pi^2 \cdot R \cdot y_{\max} (1 + k_2) HB \quad (9)$$

где y_{\max} - максимальная глубина внедрения индентора в i -том цикле колебаний, $k_2 = \frac{h_a}{y}$ - коэффициент высоты валика, k_1 - коэффициент размерности, HB - твердость обрабатываемого материала по Бринеллю.

Кроме того установлено, что возникновение автоколебаний возможно только при превышении критической скорости выглаживания $V_{кр}$. Для инструмента с индентором, имеющим сферическую форму заточки, на основе расчётной схемы (рис. 3) определена скорость выглаживания $V_{кр}$, которой соответствует граница автоколебательного процесса:

$$V_{кр} = \frac{dy}{dt} \cdot \sqrt{\frac{2 \pi R}{y(k_2 + 1)}} \quad (10)$$

Фактически при снижении скорости выглаживания $V < V_{кр}$ и виброскорости индентора $dy/dt < 0$ происходит уменьшение жесткости контакта «индентор - обрабатываемая поверхность» и при достижении $V=0$ происходит разрыв контакта ($C_{0вых}=0$), рис 3б.

Для исследования влияния параметров нелинейно-динамического ядра C_0 , h_a , HB, $F_{тр}$, B_1 , m_1 , и R на виброустойчивость процесса упругого выглаживания в программном пакете Vissim 5 на основе уравнений 4-7 и 8-9 разработана имитационная модель, представленная на рис. 4.

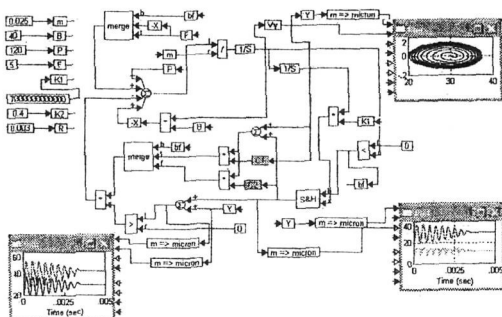


Рис. 4. Имитационная модель нелинейной динамики упругого выглаживания в программном пакете Vissim 5

Таким образом, во второй главе разработана математическая нелинейно-динамическая модель упругого выглаживания поверхности детали тела вращения на динамически жёстком станке и её программная реализация в пакете Vissim 5 для имитационного моделирования широкого спектра изменения параметров модели.

Третья глава посвящена имитационному моделированию влияния режимов выглаживания и параметров инструмента на динамические характеристики и виброустойчивость процесса выглаживания методом многолистного фазового портрета. На рис.5 представлен разработанный многолистный фазовый портрет динамики процесса упругого выглаживания для модели с параметрами НДЯ, соответствующими применению типового инструмента (конструкция Оudinцова Л.Г.): $R=3$ мм; $m=0.025$ кг; $B=40$ Н/м/сек; $P=120$ Н; $F_{тр}=5$ Н; $k_1=7 \cdot 10^{12}$ Н/м³; $k_2=0.4$.

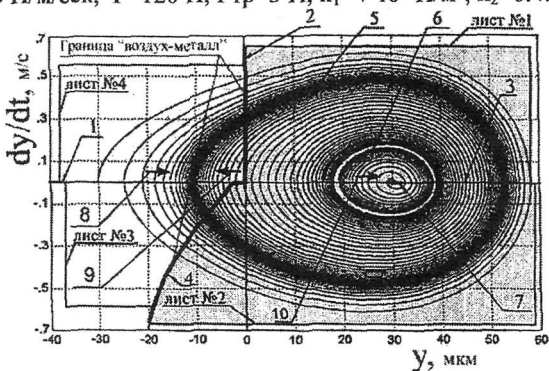


Рис. 5. Многолистный фазовый портрет нелинейно-динамического процесса упругого выглаживания:

1,3 – границы изменения знака силы трения, 2 – граница входа индентора в обрабатываемый материал, 4 – граница выхода индентора из обрабатываемого материала, 5 – траектория автоколебательного движения индентора, 6 – граница перехода к затухающим колебаниям индентора, 7 – участок устойчивого состояния процесса.

Линии 5 и 7 представляют собой аттракторы фазового портрета, характеризующие автоколебательное (линия 5) или устойчивое (линия 7) состояние процесса.

Стрелки 8 и 9 показывают направление фазовых траекторий к автоколебательному аттрактору, стрелка 10 - направление фазовых траекторий к устойчивому аттрактору 7. На основе созданного фазового портрета установлено, что размер аттрактора 7 определяется величиной силы сухого трения в упругодемпфирующих элементах конструкции выглаживателя и формирует амплитуду волнистости обработанной поверхности (L):

$$L = \frac{2F_{\text{тр}}}{C_0} \quad (11)$$

При анализе фазового портрета (рис. 6а) установлено, что уменьшение силы выглаживания повышает устойчивость процесса.

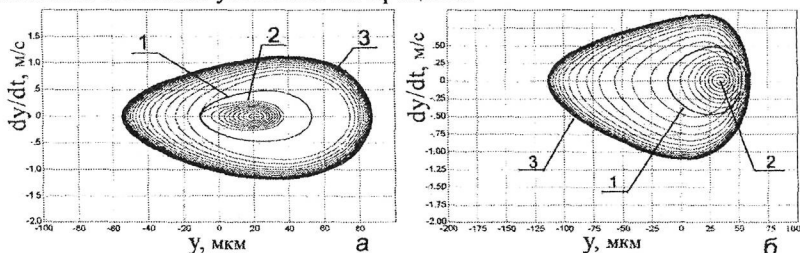


Рис. 6. Фазовые портреты при различных силах выглаживания (а) и коэффициентах k_2 (б), характеризующих высоту валика h_b
а - 1 - $P=120$ Н, 2 - $P=60$ Н, 3 - $P=240$ Н; б - 1 - $k_2=0,4$, 2 - $k_2=0,2$, 3 - $k_2=0,8$

Уменьшение силы выглаживания вызывает слияние устойчивого и неустойчивого предельных циклов с образованием устойчивого фокуса 2 и является переходом от автоколебательного к динамически устойчивому процессу выглаживания.

По фазовому портрету (рис. 6б) установлено доминирующее влияние изменения коэффициента высоты валика k_2 на устойчивость процесса выглаживания. Определены границы изменения параметров нелинейно-динамической системы процесса упругого выглаживания, соответствующие критическому затуханию для различных значений силы выглаживания P (рис. 7а) и коэффициента высоты валика k_2 (рис. 7б).

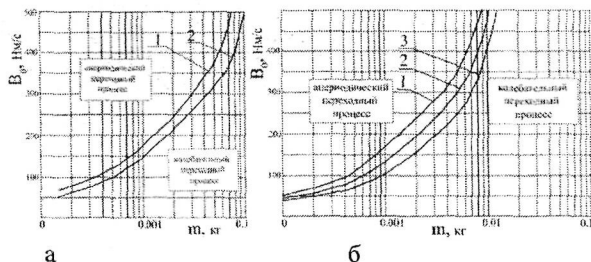


Рис. 7. Зависимость массы m и коэффициента эквивалентного вязкого трения B_0 упругодемпфирующих элементов выглаживателя, соответствующие критическому затуханию.

а-1-при $P=200$ Н, 2-при $P=100$ Н; б-1-при $k_2=2$, 2-при $k_2=0,6$, 3-при $k_2=0,2$.

Таким образом, в третьей главе на основе разработанного и реализованного в пакете Vissim-5 многолистного фазового портрета установлены границы допустимых изменений параметров инструмента и режимов выглаживания, которые могут обеспечить динамическую стабилизацию процесса.

В четвёртой главе предложена новая конструкция выглаживающего инструмента с узлом динамической стабилизации индентора, выполнено экспериментальное исследование диссипативных сил, возникающих в упругодемпфирующем элементе узла и научно обоснована форма заточки рабочей части инденторов инструмента для отделочного выглаживания.

На основе полученных в третьей главе результатов моделирования в конструкции выглаживающего инструмента выделен узел динамической стабилизации (УДС). Обобщенная схема узла динамической стабилизации выглаживающего инструмента представлена на рис. 8.

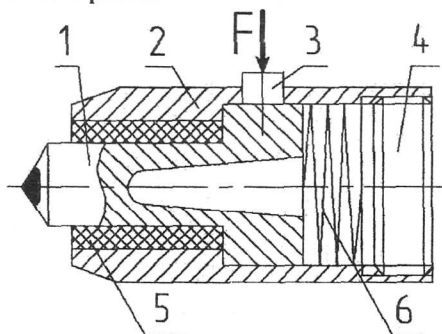


Рис. 8. Обобщенная схема узла динамической стабилизации индентора инструмента для высокопроизводительного отделочного выглаживания

1-индентор со специальной формой заточки рабочей части, 2- корпус, 3- нагрузочный сухарь демпфера сухого трения; 4- винт для задания диапазона силы выглаживания, 5- упругодемпфирующий элемент вязкого трения, 6 - упругий элемент; F- нагрузка.

Переход от обобщенной схемы к реальной конструкции узла динамической стабилизации осуществлён на основе анализа энергетического баланса колебательного движения индентора. Установлены два уровня управления энергетикой колебаний индентора при отделочном выглаживании.

Первый уровень управления (конструкционный) обеспечивает диссипацию накопленной энергии колебаний индентора за счёт применения упругодемпфирующего элемента вязкого трения и уменьшения массы индентора посредством полый конструкции при исключении воздействия демпфирующих сил сухого трения на динамику процесса. Для выбора типа и конструктивных параметров упругодемпфирующих элементов УДС создана экспериментальная установка, позволившая определить эквивалентные коэффициенты вязкого трения и динамической жёсткости (рис. 9).

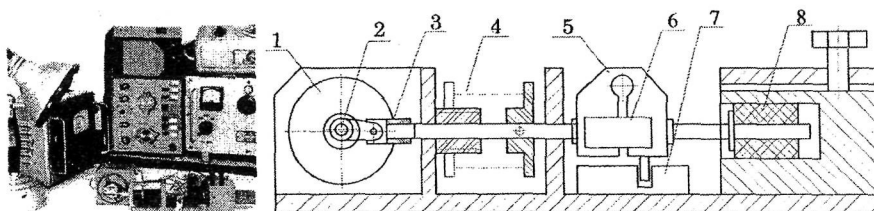


Рис. 9. Схема экспериментальной установки для исследования упругодемпфирующих элементов

1 – регулируемый электродвигатель; 2 – эксцентрик; 3 – муфта; 4 – устройство нагружения; 5 – динамометрическое устройство; 6 – индуктивный датчик усилия; 7 – индуктивный датчик амплитуды вибраций; 8 – исследуемый упругодемпфирующий элемент

В схеме установки (рис. 9), показан исследуемый упругодемпфирующий элемент (8) коаксиального типа из бутадиен-нитрильной резины. Кроме элемента коаксиального типа, на установке исследовались демпфирующие свойства резинового упругодемпфирующего элемента сжатия (рис. 10 а) и элемента плунжерного типа с демпфером сухого трения (рис. 10б).

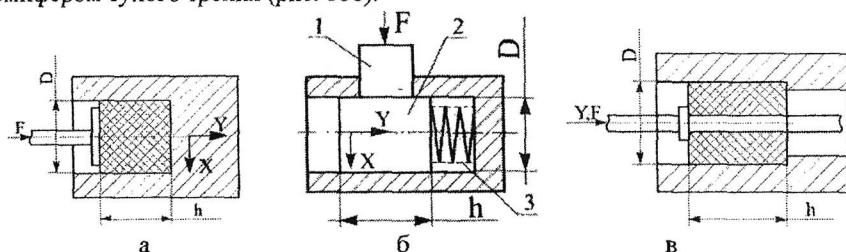


Рис. 10. Исследуемые упругодемпфирующие элементы: а - резиновый элемент сжатия; б - элемент плунжерного типа; в - резиновый элемент коаксиального типа; F – нагрузка; D, h –соответственно, диаметр и высота исследуемого элемента; 1-нагрузочный сухарь; 2 – плунжер; 3 – набор тарельчатых пружин

Экспериментальные исследования по физическому моделированию диссипативных сил, возникающих в упругодемпфирующих элементах узла динамической стабилизации выглаживающего инструмента, позволили установить следующее: 1-элементы на основе резины имеют демпфирующие способности сравнимые с демпфером сухого трения; 2- эквивалентные коэффициенты вязкого трения и жесткости элементов с резиновыми втулками существенно увеличиваются с ростом статической нагрузки; 3- упругодемпфирующий элемент сжатия отличается более высокими значениями эквивалентных коэффициентов вязкого трения и жесткости (рис. 11).

На основе установленных зависимостей (рис. 11) обоснован подбор упругодемпфирующих элементов узла динамической стабилизации выглаживателя с заданными свойствами.

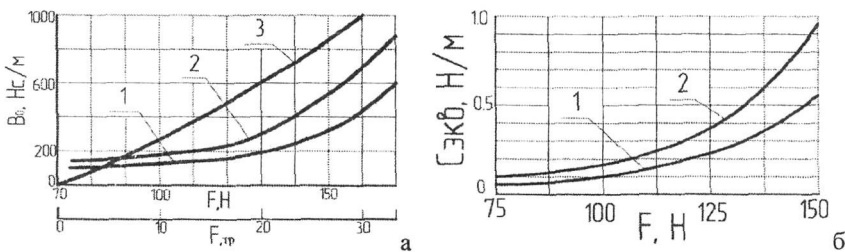


Рис. 11. Изменение коэффициентов эквивалентного вязкого трения и жесткости в упругодемпфирующих элементах в зависимости от нагрузки и силы трения:

1 - резиновый элемент коаксиального типа, 2 - резиновый элемент сжатия, 3 - элемент плунжерного типа с демпфером сухого трения

Применение резиновых упругодемпфирующих элементов позволило увеличить эквивалентный коэффициент вязкого трения до $B_1=(200 - 400)$ Нс/м при минимальном значении величины силы сухого трения и предопределило уменьшение массы подвижных частей инструмента до уровня $m=(2 - 10)$ г.

Второй уровень управления энергетикой колебательного движения индентора (технологический) призван обеспечить снижение притока энергии в динамический процесс. Это реализовано за счёт изменения механизма взаимодействия рабочей части индентора инструмента с поверхностью детали. Схема механики взаимодействия элементов рабочей части индентора с поверхностью детали при отделочном выглаживании представлена на рис. 12.

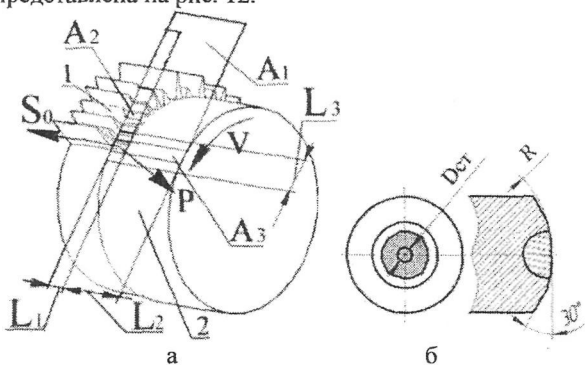


Рис. 12. Схема механики взаимодействия рабочей части индентора с поверхностью детали(а) и специальная форма заточки индентора (б):

1- исходная шероховатость, 2- выглаженная поверхность, $D_{ст}$ - диаметр стабилизирующего участка

На представленной схеме внедрение индентора в обрабатываемую деталь ограничено уровнем профиля выглаживаемой поверхности 2. Исходная шероховатость 1 деформируется участком A_2 рабочей поверхности индентора A_1 . Размер L_1 участка A_2 в осевом направлении численно равен подаче S_0 при выглаживании. Стабилизация положения индентора на уровне профиля выглаживаемой поверхности 2

обеспечивается участком A_3 рабочей поверхности индентора, который выполняет функции нелинейного переключающего устройства. Отклонение стабилизирующего участка A_3 от уровня профиля выглаживаемой поверхности 2 изменяет направление суммы сил, приложенных к упруго-инерционной части узла динамической стабилизации на противоположное.

Стабильность процесса отделочного выглаживания обеспечивается при выполнении условий:

$$\sigma_b S_{A3} > P > \sigma_b S_{A2}; D_{ct} \geq L_1 + L_2; D_{cm} \geq 2\sqrt{DR_z} \quad (12)$$

где σ_b - предел прочности материала детали, S_{A_i} - площадь участка A_i .

Радиус рабочей поверхности индентора выбирают из условия:

$$R = \frac{D_{cm}}{2 \sin \alpha}; \quad \text{где } \alpha = (1-5)^\circ. \quad (13)$$

Специальная форма заточки ограничила перемещение рабочей части индентора уровнем выглаженной поверхности 2 (рис. 12а). Созданный узел динамической стабилизации позволил минимизировать время колебательного переходного процесса индентора и значительно увеличить скорость выглаживания за счёт повышения запаса виброустойчивости процесса. Обоснована и запатентована (патент РФ № 70176) специальная форма заточки рабочей части сменного индентора, обеспечившая уменьшение шероховатости обрабатываемой поверхности.

Таким образом, в четвёртой главе в конструкции выглаживающего инструмента выделен и обоснован узел динамической стабилизации, выполнены экспериментальные исследования по выбору типа и характеристик упругодемпфирующих элементов узла, разработана форма заточки рабочей части индентора в УДС, что позволила решить проблему динамической стабилизации высокопроизводительного отделочного выглаживания.

В пятой главе приведена инженерная методика определения оптимального натяга упругого элемента УДС (обеспечение силы выглаживания) по критерию требуемой величины шероховатости и выполнена оценка результатов динамической стабилизации высокопроизводительного отделочного выглаживания разработанным быстросменным инструментом на основе практической реализации многоцелевой обработки шпинделей и штоков на токарно-фрезерных центрах MULTUS B-300W, ES-L8II-M (OKUMA).

Оптимальный натяг упругого элемента УДС инструмента определяется на основе экспериментального поиска экстремума минимального значения шероховатости R_a при отделочном выглаживании поверхности тестовой детали на токарно-фрезерном центре с силой выглаживания программно управляемой по линейному закону после чистового точения (технология «wiper» фирмы Sandvic Coromant), выполненных за один установ.

Предельное минимальное значение натяга Δ_{\min} назначается по точке $R_{a_{\max}} = R_{a_{\text{зад}}}$, которая соответствует максимальному допустимому уровню шероховатости уплотнительной поверхности изделия- прототипа. Предельное максимальное значение натяга Δ_{\max} устанавливается по точке $R_{a_{\min}}$, которая соответствует экспериментально определённой минимальной величине шероховатости поверхности тестовой детали (рис 13).

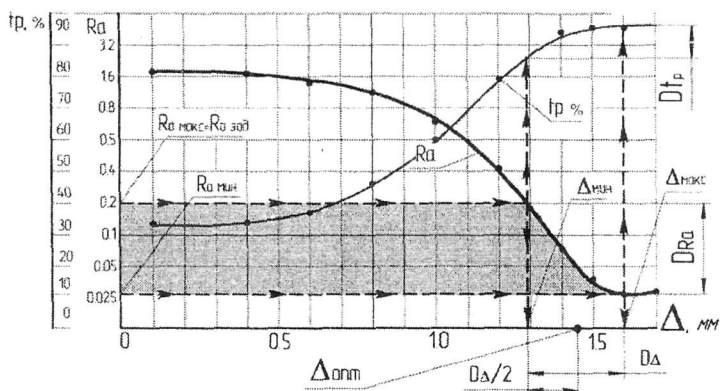


Рис. 13. Схема определения оптимального натяга $\Delta_{\text{опт}}$ упругодемпфирующего элемента УДС выглаживателя по критерию заданной шероховатости R_a
 D_{Δ} -диапазон допустимых значений натяга, D_{R_a} - диапазон допустимых значений шероховатости R_a ;
 D_{l_p} -диапазон значений опорной поверхности.

Оптимальное значение натяга соответствует середине найденного диапазона.

$$\Delta_{\text{опт}} = \Delta_{\text{мин}} + D_{\Delta} / 2 \quad (14)$$

Отделочное выглаживание уплотнительной поверхности шпинделя задвижки высокого давления ($DN=100$ мм, $PN=16$ МПа) на токарно-фрезерном центре MULTUS B-300W (рис 14 а) выполнялось разработанным быстросменным выглаживателем с УДС, представленном на рис 14в.

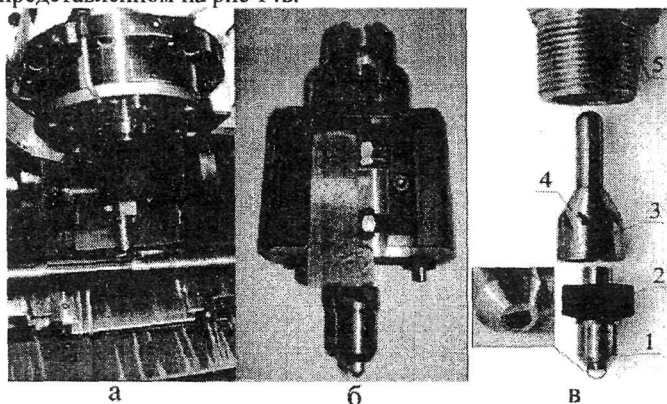


Рис. 14. Отделочное выглаживание шпинделя задвижки на токарно-фрезерном центре MULTUS B-300W (а); быстросменный выглаживатель в инструментальной оправке центра (б); узел динамической стабилизации (в)

Узел динамической стабилизации установлен в корпусе 5 выглаживателя и содержит: индентор 1 с выточкой для уменьшения массы, упругодемпфирующий

элемент 2 и втулку 3 с отверстиями 4 для подвода охлаждающей низкокипящей жидкости, направленной в полость корпуса 5 (рис 14в).

Высокопроизводительная отделочная обработка выглаживателем с УДС при оптимальном натяге обеспечила стабильное уменьшение высотных параметров шероховатости поверхности от $Ra=(1.2-0.6)$ мкм до $Ra=(0.02-0.15)$ мкм и увеличение относительной опорной поверхности профиля от $t_p=(35-55)\%$ до значения $t_p=(85-95)\%$. Внедрение опытных образцов выглаживателей для обработки уплотнительных поверхностей шпинделей задвижек высокого давления (АК «Корвет», г. Курган) позволило обеспечить шероховатость поверхности $Ra=0.027-0.15$ мкм (до внедрения $Ra=0.2$ мкм) и, в результате замены полирования выглаживанием, получить годовую экономию в 385000 рублей при изготовлении 23500 штук шпинделей. Серийно выпускаемые на ООО «Предприятие «Сенсор» (г. Курган) прямоточные запорные клапаны высокого давления после финишной механической обработки штоков за один установ с применением отделочного выглаживания запатентованным инструментом увеличили наработку на отказ с 450 до 1750 циклов.

Основные выводы и результаты работы

1. Разработана математическая модель нелинейной динамики процесса упругого выглаживания поверхностей тел вращения на динамически жёстком станке, в основу построения которой положено представление динамической системы в виде нелинейно-динамического ядра (НДЯ), нелинейные параметры которого и предопределяют возможность автоколебательного движения индентора инструмента и открывают пути управления динамической стабилизацией процесса.
2. Выделено четыре участка (фазы) в цикле колебательного движения индентора при взаимодействии с поверхностью детали в процессе упругого выглаживания.
3. Выявлен основной источник автоколебательного движения индентора инструмента: гистерезисный характер изменения высоты валика в контакте «индентор-обрабатываемая поверхность».
4. Установлена зависимость критической скорости финишной обработки $V_{кр}$ для упругих выглаживателей со сферической формой рабочей части индентора, превышение которой приводит к возникновению автоколебаний.
5. Создан многолистый фазовый портрет нелинейной динамики упругого выглаживания, позволивший имитационным моделированием установить условия перехода от автоколебательного к динамически устойчивому процессу выглаживания в виде предельных циклов и определить границы изменения параметров упругодемпфирующих элементов и массы индентора инструмента
6. Научно обоснован синтез встроенного УДС выглаживающего инструмента на основе двухуровневого управления энергетикой колебательного движения индентора, соответственно:
 - диссипацией накопленной энергии полого индентора упругодемпфирующими элементами специальной конструкции (конструкционный уровень)
 - снижением притока энергии за счёт изменения механики контактного взаимодействия формой заточки рабочей части индентора (технологический уровень).

7. Разработан и запатентован быстросменный инструмент с узлом динамической стабилизации (УДС) для высокопроизводительного виброустойчивого отделочного выглаживания уплотнительных поверхностей шпинделей и штоков трубопроводной арматуры, обрабатываемых на многоцелевых токарно-фрезерных центрах за один установ.
8. Разработана и апробирована в производственных условиях инженерная методика определения оптимального натяга упругого элемента УДС выглаживателя (обеспечение силы выглаживания) по критерию требуемой величины шероховатости R_a обработанной поверхности.
9. Применение запатентованного инструмента с УДС позволило практически реализовать высокопроизводительное отделочное выглаживание деталей из нержавеющей сталей (скорость 300 м/мин, подача 0,3 мм/об).
10. Практическое применение инструмента с УДС при многоцелевой обработке на токарно-фрезерном центре стабильно обеспечило шероховатость микрорельефа $R_a=(0.02-0.15)$ мкм при опорной поверхности $t_p=(85-95)\%$.
11. Внедрение опытных образцов выглаживателей для обработки уплотнительных поверхностей шпинделей задвижек высокого давления (АК «Корвет», г. Курган) позволило обеспечить шероховатость поверхности $R_a=0.02-0.08$ мкм (до внедрения $R_a=0.2$ мкм) и, в результате замены полирования выглаживанием, получить годовую экономию в 385000 рублей при изготовлении 23500 штук шпинделей.
12. Серийно выпускаемые на ООО «Предприятие «Сенсор» (г. Курган) прямоточные запорные клапаны высокого давления, после финишной механической обработки штоков с применением отделочного выглаживания опытным инструментом на многоцелевом токарно-фрезерном центре, увеличили наработку на отказ с 450 до 1750 циклов.

Список публикаций по теме диссертации:

1. Горгоц В. Г., Кузнецов В. П., Губанов В. Ф. Теоретический анализ динамики процесса алмазного выглаживания поверхностей деталей методом фазовой плоскости. // Технология машиностроения.- 2006, №11(53).- С.19-24.(список ВАК);
2. Горгоц В. Г., Кузнецов В. П., Губанов В. Ф., Ильичёв С. А. Оптимизация процесса алмазного выглаживания деталей компрессорной техники. // Компрессорная техника и пневматика.- 2006, №8.- С.33-35.(список ВАК);
3. Горгоц В. Г. Обеспечение эксплуатационных свойств деталей запорной арматуры при ремонте трубопроводов. // Новые машины и технологии для ремонта магистральных трубопроводов. Материалы Международной научно-технической конференции.- Курган.- 2006.- С.103-106.;
4. Горгоц В. Г., Кузнецов В. П., Губанов В. Ф. Выглаживатель. Патент РФ на полезную модель № 62554 // Бюллетень изобретений.- 27.04.2007;
5. Горгоц В. Г., Кузнецов В. П., Губанов В. Ф., Ильичёв С. А. Выглаживатель. Патент РФ на полезную модель №68950 // Бюллетень изобретений.- 10.12.2007г.;
6. Горгоц В. Г., Кузнецов В. П., Губанов В. Ф. Индентор. Патент РФ на полезную модель №74334 // Бюллетень изобретений. - 27.06.2008г.;

7. Горгоц В. Г., Кузнецов В. П., Губанов В. Ф. Выглаживатель. Патент РФ на полезную модель №74095 // Бюллетень изобретений. - 20.06.2008г.;
8. Горгоц В. Г., Кузнецов В. П., Ильичёв С. А. Полирующий выглаживатель. Патент РФ на полезную модель №670176 // Бюллетень изобретений. - 20.01.2008г.;
9. Ильичёв С.А., Кузнецов В. П. Губанов В. Ф. Горгоц В. Г. Выглаживатель для многооперационных токарных центров. Патент РФ на полезную модель №70178 // Бюллетень изобретений. - 20.01.2007.;
10. Кузнецов В. П., Горгоц В. Г., Губанов В. Ф., Схиртладзе А. Г. Обеспечение требуемого качества поверхностей деталей на основе управления динамической системой процесса выглаживания. Учебное пособие (с грифом УМО АМ).- Курган: Курганский гос. ун-т.- 2005.- 85 с.;
11. Кузнецов В. П., Горгоц В. Г., Ильичёв С. А. Моделирование механизма возникновения волнистости при финишных операциях обработки уплотнительных поверхностей деталей трубопроводной арматуры. // Современные проблемы машиностроения. Труды III Международной научно-технической конференции.- Томск.- 2006.- С.141-145;
12. Кузнецов В. П., Горгоц В. Г., Губанов В. Ф. Оценка качества процесса алмазного выглаживания. // Современные проблемы машиностроения. Труды III Международной научно-технической конференции.- Томск.- 2006.- С.146-147;
13. Кузнецов В.П., Горгоц В.Г. Моделирование нелинейной динамики упругого выглаживания поверхностей деталей на основе теоретического исследования энергетики автоколебательного процесса. // Кибернетика и высокие технологии XXI века. Труды IX международной научно-технической конференции.- Воронеж.- 2008.- Том 2.- С. 1078-1087.
14. Кузнецов В. П., Кузнецов Д. В., Горгоц В. Г. Определение границ виброустойчивости процесса упругого выглаживания на основе имитационной модели нелинейно-динамического ядра методом многолистного фазового портрета. // Вестник Курганского государственного университета. Серия «Технические науки». Выпуск 4.- № 3,(13). - 2008. - С.74-75.

Личный вклад автора в работах, опубликованных в соавторстве, составляет не менее 50 %.

Подписано в печать	Формат 60×84/16	Бумага тип. №1
Печать офсетная	Усл. печ. л. 1.25	Уч.-изд. л. 1.25
Заказ <i>190</i>	Тираж 100 экз.	

Редакционно-издательский центр КГУ