



ПОЛИТЕХ
Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого

На правах рукописи

Васильев Андрей Андреевич

**Повышение качества токарной обработки крупногабаритных
валов за счёт конструктивных параметров гидростатических
опор с неполным углом обхвата**

2.5.6. Технология машиностроения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург

2023

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургском политехническом университете Петра Великого».

Научный руководитель

Коротких Михаил Тимофеевич, профессор, доктор технических наук.

Официальные оппоненты:

Петров Владимир Маркович, профессор, доктор технических наук, кафедра технологии и производства артиллерийского вооружения, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Балтийский государственный технологический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова», г. Санкт-Петербург.

Захаров Сергей Владимирович, кандидат технических наук, главный эксперт отдела разработки ООО «Русгидро ИТ Сервис», г. Москва.

Ведущая организация

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет», г. Санкт-Петербург.

Защита диссертации состоится «17» октября 2023 г. в 16:00 часов на заседании диссертационного совета У.2.5.6.26 федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по адресу 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, главный учебный корпус, аудитория 346.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте www.spbstu.ru федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Автореферат разослан «___» _____ 2023 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета У.2.5.6.26,

кандидат технических наук



Хрусталева Ирина Николаевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования обусловлена отсутствием теоретических и экспериментальных исследований в области применения гидростатических опор (ГСО) с неполным углом обхвата (110 – 120 градусов) при токарной обработке крупногабаритных валов на данных опорах. При всплытии вала и его обработке точением в технологической системе «опора-вал» возникают погрешности, связанные с нагревом масла, приводящему к изменению радиального зазора в опоре вала, деформациям технологической системы. Вследствие чего возникает проблема обеспечения требуемого качества изготавливаемого крупногабаритного вала на ГСО с неполным углом обхвата.

Необходимость обеспечения требуемого качества при токарной обработке крупногабаритных валов определяет **актуальность проведения исследования** влияния конструктивных параметров ГСО с неполным углом обхвата на качество получистовой и чистовой токарной обработки крупногабаритных валов.

Цель и основные задачи исследования

Целью диссертационной работы является обеспечение требуемого качества получистовой и чистовой обработки крупногабаритных валов на токарных станках, оснащенных ГСО с неполным углом обхвата путем изменения конструктивных параметров опоры.

Для достижения цели в работе были поставлены следующие **задачи**:

- обеспечить требуемое качество получистовой и чистовой токарной обработки крупногабаритных валов с использованием в составе технологической оснастки ГСО с неполным углом обхвата;
- определить влияние конструктивных параметров гидростатической опоры с неполным углом обхвата на технологические параметры обработки точением крупногабаритных валов путем разработки методики расчёта поля давлений в ГСО с неполным углом обхвата с учётом изменения теплофизических свойств рабочей жидкости;
- провести комплекс вычислений по исследованию влияния статических параметров ГСО с неполным углом обхвата на качество токарной обработки;
- определить влияние конструктивных параметров гидростатической опоры с неполным углом обхвата на устойчивость и уменьшение колебаний при токарной обработке крупногабаритных валов;
- провести комплекс вычислений по исследованию влияния конструктивных параметров ГСО с неполным углом обхвата на качество и производительность токарной обработки крупногабаритных валов.

Научная новизна работы

В результате проведенных исследований решена задача обеспечения заданного качества крупногабаритных валов при их токарной обработке на ГСО с неполным углом обхвата. Сущность решения составляют следующие научные результаты:

1. Предложена и обоснована методика расчёта поля давлений в смазочных слоях ГСО с неполным углом обхвата в неизотермической постановке задачи;
2. Предложена и обоснована математическая модель системы «опора-вал» для определения статических характеристик ГСО с неполным углом обхвата в зависимости от конструктивных параметров опоры;
3. Предложена и обоснована математическая модель системы «опора-вал» для определения динамических характеристик и устойчивости ГСО с неполным углом обхвата в зависимости от конструктивных параметров опоры;
4. Теоретически обоснованно, что на качество и производительность полустойковой и чистой токарной обработки крупногабаритных валов на ГСО с неполным углом обхвата влияет конструктивные параметры опоры.

Теоретическая и практическая значимость

Теоретическая значимость работы состоит в разработке следующих методик и математических моделей:

1. Методика расчёта поля давлений в смазочных слоях ГСО с неполным углом обхвата при обработке точением крупногабаритных валов в условиях переменных теплофизических свойств рабочей жидкости.
2. Математическая модель системы «опора-вал» для определения статических характеристик ГСО с неполным углом обхвата.
3. Математическая модель системы «опора-вал» для определения динамических характеристик и устойчивости ГСО с неполным углом обхвата.
4. Методика определения оптимальных режимов резания и технологических параметров токарной обработки крупногабаритного вала в зависимости от конструктивных параметров ГСО с неполным углом обхвата.

Практическая значимость:

Получены данные о влиянии конструктивных параметров ГСО с неполным углом обхвата на качество токарной обработки крупногабаритных валов.

Объект исследования – технологический процесс изготовления крупногабаритного вала с использованием ГСО с неполным углом обхвата.

Предмет исследования – полустатическая и статическая обработка на ГСО с неполным углом обхвата, как подсистема технологической системы изготовления крупногабаритного вала на операциях точения.

Методы исследования

Разработка математической модели рабочей области гидростатической опоры с неполным углом обхвата для расчета полей давлений в рабочей области ГСО с неполным углом обхвата производилась путем совместного решения модифицированного уравнения Навье-Стокса, балансов энергий и расходов. В качестве метода решения системы уравнений использовался метод конечных разностей. Для определения физических свойств рабочей жидкости производилась аппроксимация параметров рабочей жидкости методом наименьших квадратов. Для определения влияния опоры на качество поверхностного слоя обработанного вала осуществлялось решение динамических уравнений движения заготовки в процессе токарной обработки. В качестве оценки влияния конструктивных параметров ГСО с неполным углом обхвата на качество, производительность и себестоимость обработки использовался метод геометрического программирования (МГП). Численное решение определения характеристик и устойчивости ГСО с неполным углом обхвата, влияние на точность, качество и производительность обработки проводилось в среде «MathCAD».

Положения, выносимые на защиту

1. Методика расчёта поля давлений в смазочных слоях ГСО с неполным углом обхвата с учетом изменения теплофизических свойств рабочей жидкости.
2. Математическая модель системы «опора-вал» для определения влияния конструктивных параметров ГСО с неполным углом на статические характеристики опоры.
3. Математическая модель системы «опора-вал» для определения влияния конструктивных параметров ГСО с неполным углом обхвата на динамические характеристики и устойчивость опоры.
4. Комплекс вычислительных экспериментов по исследованию влияния конструктивных параметров ГСО с неполным углом обхвата на точность, качество и производительность токарной обработки крупногабаритных валов.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность и обоснованность научных результатов работы обеспечивается корректностью постановки задач, применением известных методик расчета, математических методов, распространённых теоретических зависимостей и сравнением теоретических результатов и значений с полученными непосредственно при обработке крупногабаритного вала на станке GEORG на заводе «ЛМЗ» ОАО «Силовые машины».

Работа соответствует паспорту специальности – 2.5.6. «Технология машиностроения» пунктам: 4 «Совершенствование существующих и разработка новых методов обработки и сборки с целью повышения качества изделий машиностроения и снижения себестоимости их выпуска», 7 «Технологическое обеспечение и повышение качества поверхностного слоя, точности и долговечности деталей машин», 3 «Математическое моделирование технологических процессов и методов изготовления деталей и сборки изделий машиностроения».

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения по результатам исследования, приложений, списка литературы из 107 наименования, общим объёмом 118 страниц машинописного текста, содержит 36 рисунков и 3 таблицы.

Во введении обоснована актуальность темы диссертационного исследования, определены цели и задачи, научная новизна и практическая значимость, приведены методы исследования, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен анализ современного состояния вопроса применения опор жидкостного трения и влияние конструктивных параметров опор на качество токарной обработки. Проведённый анализ показывает, что имеющиеся исследования и результаты в данной области ограничиваются общими рекомендациями проектирования и применения ГСО с неполным углом обхвата, как частного случая опор жидкостного трения. Расчёт поля давлений для ГСО с неполным углом обхвата, как частного случая опор жидкостного трения в неизотермической постановки задачи встречается в работах Шатохина С. Н. Определение динамических показателей конических опор жидкостного трения рассмотрено в работах Корнеева А. Ю. Расчеты температуры в зазоре опор жидкостного трения встречаются в работах зарубежных авторов Sinha P., Chandra P., Nebojsa N., Zivota A., Dogic J и др., так же и у российских авторов Ермилова Ю. И., Равиковича Ю. А., но рассматриваемые поля температур относятся к опорам жидкостного трения закрытого типа при вращении вала без его изготовления операцией точения. Влияние конструктивных параметров опор жидкостного трения на их статические и динамические характеристики встречаются в работах зарубежных авторов Dimond T., Younan A., Ta-Hua L., Shin-Chien L., Xiaobo Z., Shengyi L., Allaire P. E., Flack R. D., Braun M. J., Dzodzo M., Heinrichson N. Влияние конструктивных параметров опор жидкостного трения на рабочий зазор и на их характеристики рассмотрено в работах авторов Waheed R., Guiyun J., Yuanxin L. и российских авторов Строк Л. В., Пикалов Л. В, Пожбелко В. И. Обеспечение точности форм

и размеров нежестких валов при их токарной обработке встречается в работах авторов Нестренко П. С. Математическая модель для определения влияние вибраций режущей кромки инструмента на качество токарной обработки можно встретить в работах авторов Фадин Д. М., Шуваев А. В.

Имеющиеся на сегодняшний день исследования в области применения опор жидкостного трения при изготовлении операцией точения крупногабаритных валов не позволяют определить влияние конструктивного исполнения опор на качество обрабатываемых валов. Необходимость решения поставленной проблемы позволила осуществить постановку **задач исследования**, состоящей в обеспечении требуемого качества крупногабаритного вала при получистовой и чистовой токарной обработке на ГСО с неполным углом обхвата.

Во второй главе представлена методика определения поля давлений для ГСО с неполным углом обхвата, необходимая для определения характеристик опоры с целью исследования влияния конструктивных параметров опоры на технологические параметры обработки точением крупногабаритного вала. Для построения математической модели рабочей области опоры в неизотермической постановке задачи, произведены расчёты баланса энергий, расходов и модифицированного уравнения Навье-Стокса, заданы граничные условия в соответствии поставленной задаче. Физическая модель ГСО с неполным углом обхвата представлена на Рисунке 1.

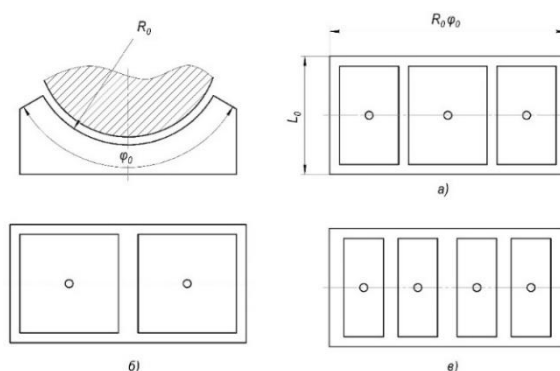


Рисунок 1 – ГСО с неполным углом обхвата:

а) с 3-мя карманами, б) с 2-мя карманами, в) с 4-мя карманами

При рассмотрении геометрии ГСО с неполным углом обхвата исходными параметрами являются: радиус опоры R_0 , ширина подшипника L_0 и угол развертки φ_0 (Рисунок 1).

Величина рабочего зазора h оказывает существенное влияние на распределение давления в смазочном слое и имеет следующий вид:

$$h(\varphi) = h_0 - X \sin\left(\varphi - \frac{\varphi_0}{2}\right) - Y \cos\left(\varphi - \frac{\varphi_0}{2}\right), \quad (1)$$

где h_0 – начальный зазор, φ_0 – угол обхвата опоры.

Рассмотрение течения смазочного материала в радиальном зазоре и дальнейшее построение математической модели производится в декартовой системе координат (Рисунок 2).

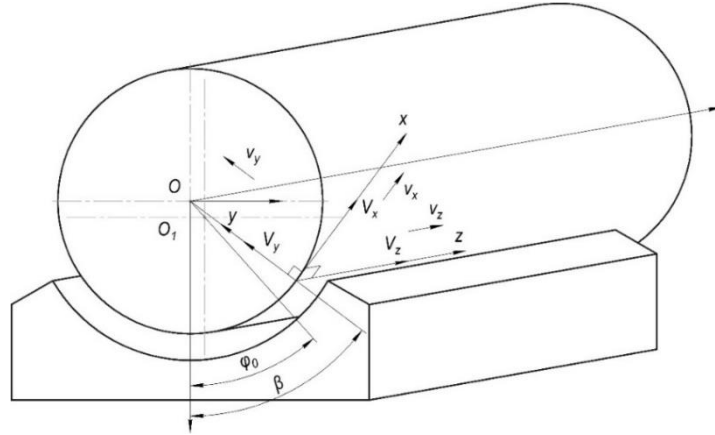


Рисунок 2 – Физическая модель течения смазочного материала в ГСО

Уравнение для определения поля давлений – модифицированное уравнение Навье-Стокса, обобщенное для ламинарного течения вязкой сжимаемой рабочей жидкости:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\rho h^3}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\rho h^3}{\mu} \frac{\partial p}{\partial z} \right) = \\ = 12h \frac{\partial p}{\partial t} + 6 \frac{\partial}{\partial x} (\rho h V_x) + 6 \frac{\partial}{\partial z} (\rho h V_z) + 12\rho V_y, \end{aligned} \quad (2)$$

где ρ – плотность рабочей жидкости, μ – динамический коэффициент вязкости рабочей жидкости, p – давление в рабочем зазоре, V_i – скорости течения жидкости по координатам x, y, z .

Для неизоэтермической постановки задачи требуется включение в математическую модель уравнения баланса энергий. Энергетический баланс при условии отсутствия теплообмена с сопряжёнными поверхностями шейки вала и корпуса вкладыша в адиабатной постановке задачи для течения вязкой жидкости описывается формулой:

$$\begin{aligned} \rho C_p \left[\left(1 - \frac{h^2}{6\mu U} \frac{\partial p}{\partial x} \right) \frac{\partial T}{\partial x} - \frac{h^2}{6\mu U} \frac{\partial p}{\partial z} \frac{\partial T}{\partial z} \right] = \\ = \frac{2\mu U}{h^2} \left[1 + \frac{h^4}{12(\mu U)^2} \left(\left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right)^2 \right) \right], \end{aligned} \quad (3)$$

где C_p – удельная теплоемкость, U – скорость вращения вала, T – температура рабочей жидкости.

Давление в питающих камерах p_H рассчитывается исходя из уравнения баланса расходов, при условии положительного расхода, когда давление подачи масла в опору p_0 больше давление в карманах ($p_0 > p_H$):

$$Q_H = Q_z + Q_x + Q_y \quad (4)$$

Массовые расходы, входящие в (4):

- 1) Q_H – суммарный массовый расход рабочей жидкости:

$$Q_H = \frac{\pi d_H^2}{128 l_H} \frac{(p_0 - p_H)(\rho_0 + \rho_H)}{K(\mu_0 + \mu_H)}, \quad (5)$$

где K – обобщенный коэффициент, характеризующий интенсивность течения.

- 2) Q_z и Q_x – массовые расходы рабочей жидкости через контур карманов опор, в соответствующих направлениях.
3) Q_y – массовый расход рабочей жидкости, возникающий из-за радиального смещения шейки вала.

Решение уравнения (4) позволяет через уравнение (5) определить давление рабочей жидкости p_H в камерах. Суммарный массовый расход смазочного материала, определяется по формуле:

$$Q_m = \frac{\pi d_H^4}{128 l_H} \sum_{n=1}^{N_k} \left(\frac{(p_0 - p_H)(\rho_0 + \rho_H)}{K(\mu_0 + \mu_H)} \right)_n, \quad (6)$$

где N_k – число камер, d_H, l_H – конструктивные параметры каналов подачи рабочей жидкости.

Справочные данные по используемому маслу в ГСО с неполным углом обхвата приведены в Таблице 1. Путем аппроксимации табличных данных используемого однофазного материала, получаем аналитические зависимости в виде функций свойств рабочего материала: $I, \rho, \mu, C_p = F(T)$.

Таблица 1 –Теплофизические свойства гидравлического масла DIN25

№	Параметр	Размерность	Условное обозначение	Зависимость
1	Коэффициент вязкости	Па · с	μ	$3661,4e^{-0,036T}$
2	Плотность	кг/м ³	ρ	$0,0009T^2 - 1,2243T + 1184,4$
3	Энтальпия	Дж/кг	I	$-1,482T^2 + 2279,5T - 210498$
4	Теплоемкость	Дж/(кг · °К)	C_p	$-0,0062T^2 + 4,554T + 321,55$

При расчете поля давлений в смазочном слое принимаем следующие основные допущения:

- смазочный материал заполняет весь радиальный зазор;

- смазочная среда является изотропной;
- пренебрегаем изменением термодинамических параметров по толщине рабочего зазора в связи с малым значением зазора;
- не учитывается изменение объёма смазочного материала из-за изменения температуры в рабочем зазоре;
- отсутствие проскальзывания смазочного материала по рабочим поверхностям опоры и шейки вала ротора;
- не учитываем шероховатость шейки вала и опоры, считаем форму поперечного сечения постоянной вдоль оси опоры.

Алгоритм расчета реакций смазочного слоя в ГСО с неполным углом обхвата в неизотермической постановке задачи при изготовлении операцией точения крупногабаритного вала представлен на Рисунке 3.

Определение поля давлений проводилось в обезмеренной форме с дискретизацией опорной поверхности ГСО с неполным углом путем покрытия ее регулярной ортогональной сеткой $(M \times N)$. N, M – число узлов сетки в осевом и радиальном направлениях.



Рисунок 3 – Алгоритм расчета реакций смазочного слоя

Пример эпюр давлений, полученных по разработанной методике расчета характеристик ГСО с неполным углом обхвата, представлен на Рисунке 4.

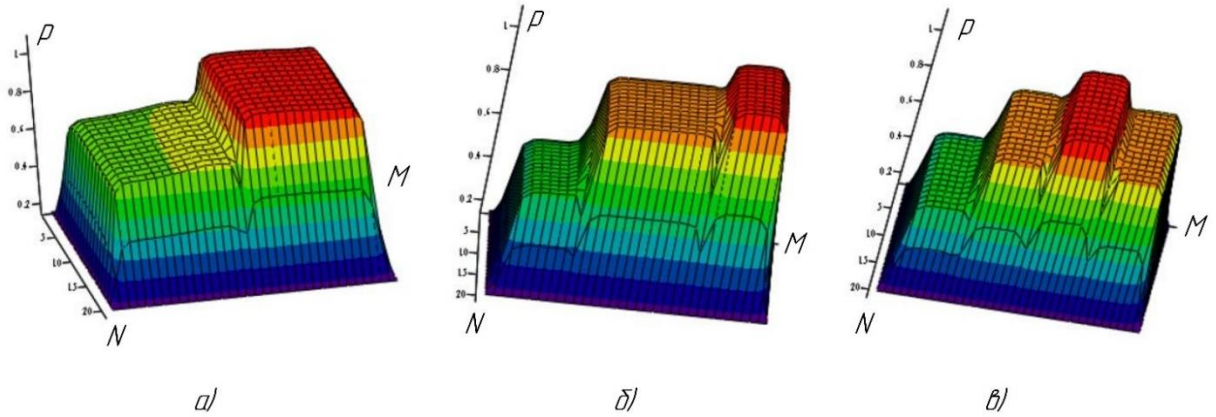


Рисунок 4 – Характерные эпюры давлений для ГСО с неполным углом обхвата: а) с 2-мя карманами б) с 3-мя карманами в) с 4-мя карманами

Разработанная методика позволяет определить поле давлений в неизоэтермической постановке задачи для ГСО с неполным углом обхвата.

Высокие значения давления в опоре положительно влияют на устойчивость опоры и уменьшение колебаний при токарной обработке, а также на точность обработки крупногабаритных валов на рассматриваемых опорах.

Наибольшие значения поля давлений показал вариант конструктивного исполнения ГСО с неполным углом обхвата с двумя карманами подачи рабочей жидкости.

В третьей главе произведен комплекс вычислительных экспериментов по исследованию влияния конструктивных параметров ГСО с неполным углом обхвата на статические характеристики и показатели точности размеров, форм и шероховатости обрабатываемого крупногабаритного вала.

Статические характеристики ГСО с неполным углом обхвата находятся путем интегрирования определенного поля давлений (глава 2) по следующим зависимостям:

- 1) Несущая способность ГСО с неполным углом обхвата:

$$W = \sqrt{R_X^2 + R_Y^2}, \quad (1)$$

где проекции гидродинамических сил, действующих на шейку вала ротора, равны:

$$R_X = \int_0^{R_o\varphi_0} \int_0^B p \sin \beta \, dx dz; \quad R_Y = \int_0^{R_o\varphi_0} \int_0^B p \cos \beta \, dx dz. \quad (2)$$

- 2) Массовый и объёмный расходы определяются по формулам:

- в осевом направлении:

$$Q_v^x = \int_0^{R_o \varphi_0} \left(-\frac{h^3}{12\mu} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{V_x h}{2} \right) dx; Q_m^x = Q_v^x \rho_0; \quad (3)$$

- в окружном:

$$Q_v^z = \int_0^{L_o} \left(-\frac{h^3}{12\mu} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{V_z h}{2} \right) dz; Q_m^z = Q_v^z \rho_0. \quad (4)$$

3) Потери мощности на трение:

$$N_{\text{тр}} = M_{\text{тр}} \omega_0, \quad (5)$$

где $M_{\text{тр}}$ – момент трения, который определяется по формуле:

$$M_{\text{тр}} = \int_0^B \int_0^{R_o \varphi_0} R_o \tau dz dx, \tau = \frac{h}{2} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\mu V_x}{h}$$

4) Потери мощности на прокатку смазочного материала:

$$N_{\text{пр}} = Q_v^x \rho_0. \quad (6)$$

Полученные зависимости несущей способности, потери мощности на трение и расхода смазочного материала от давления подачи и скорости вращения вала при его изготовлении операцией точения представлены на Рисунках 5 – 7.

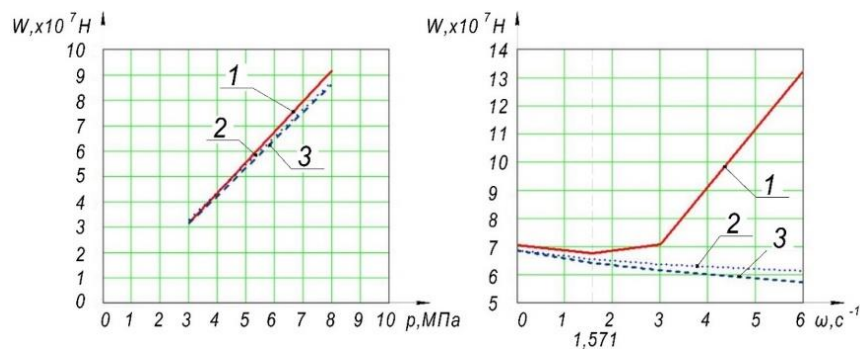


Рисунок 5 – Несущая способность ГСО с неполным углом обхвата
1 – с двумя карманами, 2 – с тремя карманами, 3 – с четырьмя карманами

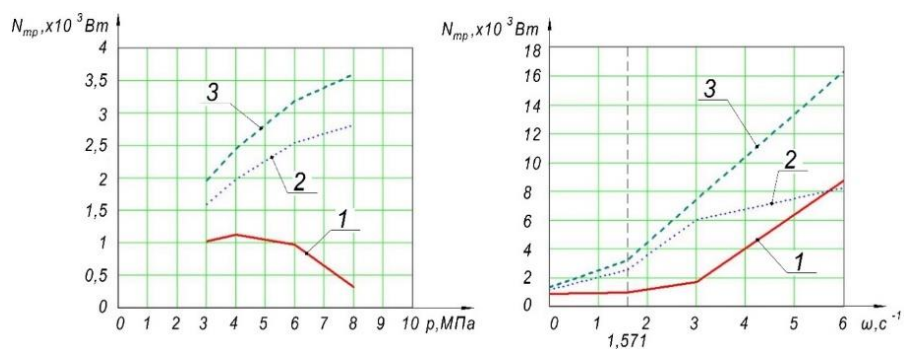


Рисунок 6 – Потери мощности на трение ГСО с неполным углом обхвата
1 – с двумя карманами, 2 – с тремя карманами, 3 – с четырьмя карманами

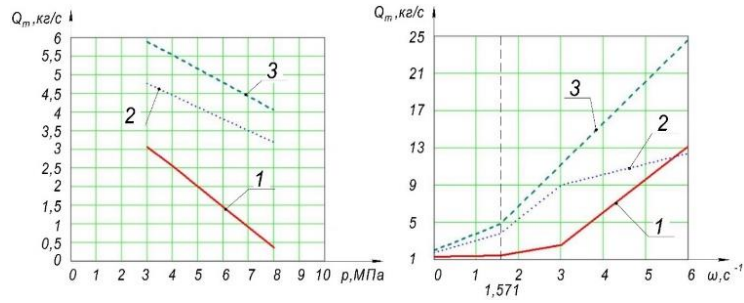


Рисунок 7 – Расход смазочного материала в ГСО с неполным углом обхвата

1 – с двумя карманами, 2 – с тремя карманами, 3 – с четырьмя карманами

Проведенных комплекс вычислительных экспериментов по влиянию конструктивных параметров ГСО с неполным углом обхвата на статические характеристики опоры и на технологические параметры обработки точением крупногабаритных валов на данных опорах показал, что наилучшим вариантом конструктивного исполнения опорной поверхности опоры является вариант с двумя карманами. Данный вариант имеет наилучшие показатели грузоподъёмности и низкий расход в сравнении с другими рассматриваемыми вариантами, что существенно влияет на точность и отсутствие колебаний в процессе изготовления операцией точения крупногабаритных валов. При увеличении скорости вращения обрабатываемой заготовки грузоподъёмность существенно возрастает для варианта с двумя карманами, что позволяет повысить производительность обработки. При отклонении центра шейки обрабатываемого вала наилучшие показатели имеет вариант с двумя карманами, что гарантирует минимизацию отклонений в процессе механической обработки вала на опорах рассматриваемого типа.

В четвертой главе рассмотрено влияние конструктивных параметров ГСО с неполным углом обхвата на динамические характеристики опоры и на устойчивость и уменьшение колебаний при токарной обработке крупногабаритных валов.

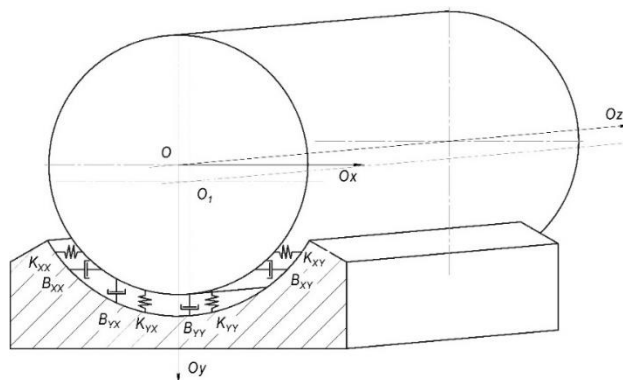


Рисунок 8 – Динамическая модель опорного узла станка

Динамические коэффициенты имеют вид:

$$K = \begin{bmatrix} K_{XX} & K_{XY} \\ K_{YX} & K_{YY} \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} B_{XX} & B_{XY} \\ B_{YX} & B_{YY} \end{bmatrix}.$$

Элементы матриц коэффициентов упругости K и демпфирования B – $K_{XX}, K_{XY}, K_{YX}, K_{YY}, B_{XX}, B_{XY}, B_{YX}, B_{YY}$ являющиеся частными производными, в положении равновесия рассчитываются по зависимостям:

$$K_{IJ} = - \left(\frac{\partial R_I}{\partial J} \right)_0; B_{IJ} = - \left(\frac{\partial R_I}{\partial \dot{J}} \right)_0; I, J = X, Y. \quad (7)$$

Зависимости динамических коэффициентов от угловой скорости вращения заготовки при обработке точением для трех вариантов конструктивных параметров ГСО с неполным углом обхвата представлены на Рисунках 9 и 10.

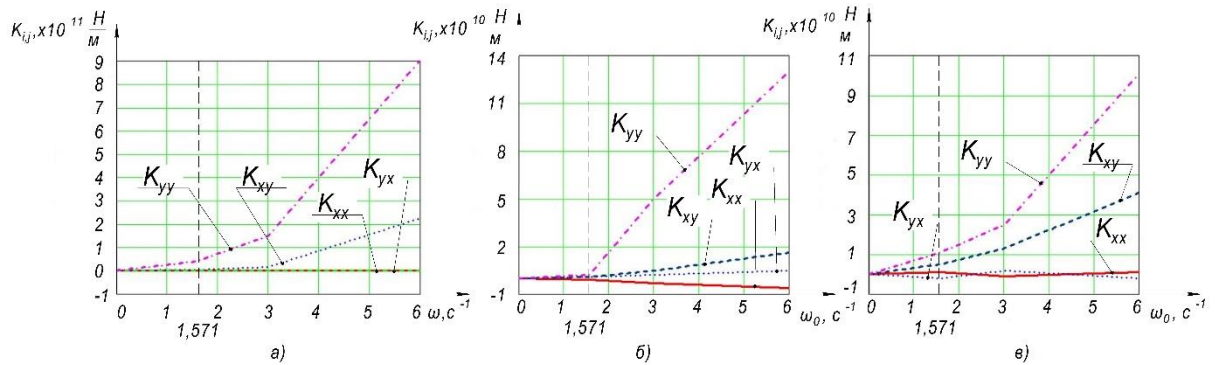


Рисунок 9 – Жесткость ГСО с неполным углом обхвата с числом карманов:

а) – с двумя, б) – с тремя, в) – с четырьмя.

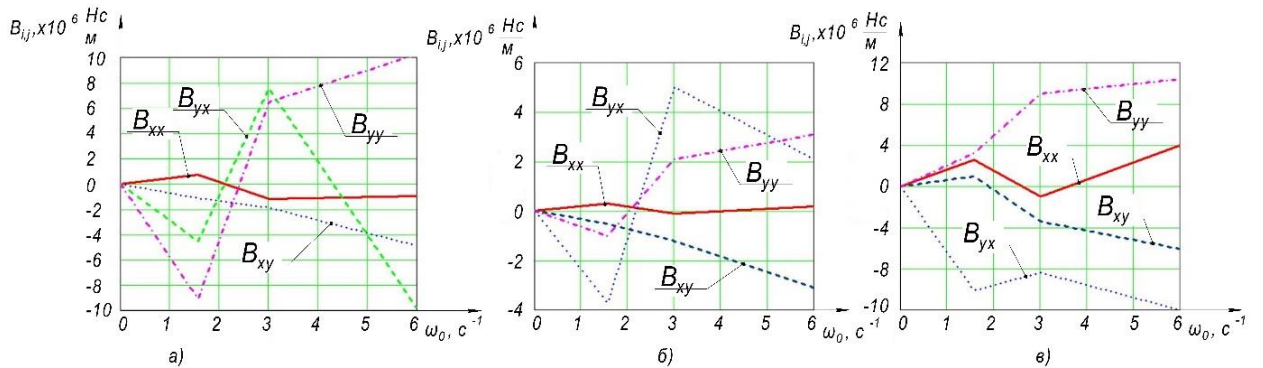


Рисунок 10 – Демпфирование ГСО с неполным углом обхвата с числом карманов:

а) – с двумя, б) – с тремя, в) – с четырьмя.

Схема обработки крупногабаритного вала на ГСО с неполным углом обхвата представлена на Рисунке 11.

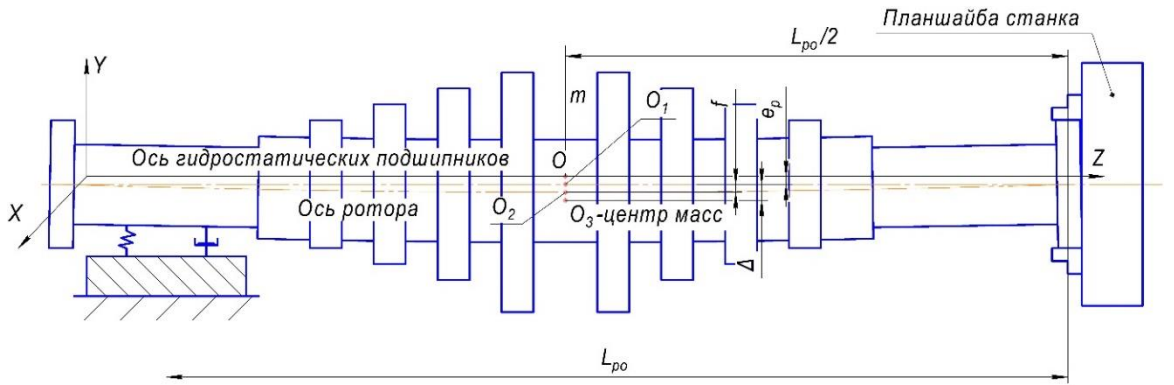


Рисунок 11 – Схема «гибкий ротор – ГСО»

Кинетическая энергии для рассматриваемого случая рассчитывается по формуле:

$$T = T_{\text{пост}} + T_{\text{вращ}}; T_{\text{пост}} = 0,5mV_{O_3}^2; T_{\text{вращ}} = 0,5J_m\omega^2 = \text{const.}$$

Уравнения Лагранжа II рода для гибкого ротора, после подстановки выражений энергий представляют собой систему уравнений:

$$\begin{cases} m(\ddot{X} + \ddot{X}_1) + mX_1 = m\Delta\omega^2 \sin \omega t; \\ m(\ddot{Y} + \ddot{Y}_1) + mY_1 = m\Delta\omega^2 \cos \omega t + mg; \\ cX_1 = -(R_{Sx} + R_{Пx} + F_x); \\ cY_1 = -(R_{Sy} + R_{Пy} + F_y), \end{cases} \quad (8)$$

где m – масса заготовки, X_i, Y_i – координаты центра масс, F_i – нагрузочная сила (сила резания), $R_{Sx,y}$ – сила реакции ГСО с неполным углом обхвата, $R_{Пx,y}$ – сила реакции патрона станка, $c = 48EI/L_{po}^2$ – жесткость заготовки,

Характеристическое уравнение системы уравнений движения гибкого сбалансированного ротора имеет вид:

$$a_0\lambda^6 + a_1\lambda^5 + a_2\lambda^4 + a_3\lambda^3 + a_4\lambda^2 + a_5\lambda + a_6 = 0. \quad (9)$$

Матрица Гурвица для гибкого ротора имеет вид:

$$\begin{bmatrix} a_1 & a_0 & 0 & 0 \\ a_3 & a_2 & a_1 & a_0 \\ 0 & a_4 & a_3 & a_2 \\ 0 & 0 & 0 & a_4 \end{bmatrix}.$$

Необходимые и достаточные условия устойчивости рассматриваемой системы выражаются в положительности (при $a_0 > 0$) всех главных диагональных миноров матрицы Гурвица:

$$\Delta_1 = a_1 > 0; \Delta_2 = a_1a_2 - a_0a_3 > 0; \Delta_3 = a_1a_2a_3 - a_1^2a_4 - a_0a_3 > 0; \Delta_4 = a_1\Delta_3 > 0.$$

Корни уравнения, находящиеся на мнимой оси ($s = 0$), имеют вид: $\lambda = \gamma i$. Здесь γ – относительная частота, равная: $\gamma = p/\omega$, где p – частота колебаний на границе

устойчивости; ω – вынужденная частота. Подстановка $\lambda = \gamma i$ приведет к следующей системе:

$$\begin{cases} -a_0\gamma^4 + a_2\gamma^2 + a_4 = 0; \\ a_1\gamma^3 - a_3\gamma = 0. \end{cases} \quad (10)$$

Исходя из системы уравнений (10) получаем уравнения для определения относительной частоты: $\gamma(a_1\gamma^2 - a_3) = 0$.

Варьируя давлением подачи масла в карманы опоры (рисунок 12) и количеством карманов (рисунок 13), получаем семейство кривых, разделяющих области устойчивой и неустойчивой работы гибких роторов в процессе изготовления операцией точения, в координатах скорость вращения вала – радиальный зазор.

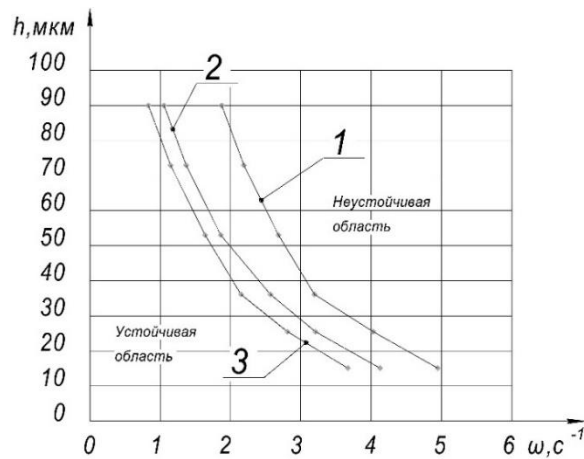


Рисунок 12 – Область устойчивости вала ротора в процессе токарной обработки на ГСО с неполным углом обхвата с двумя карманами при: 1 – $p_0 = 6$ МПа, 2 – $p_0 = 4$ МПа, 3 – $p_0 = 2$ МПа.

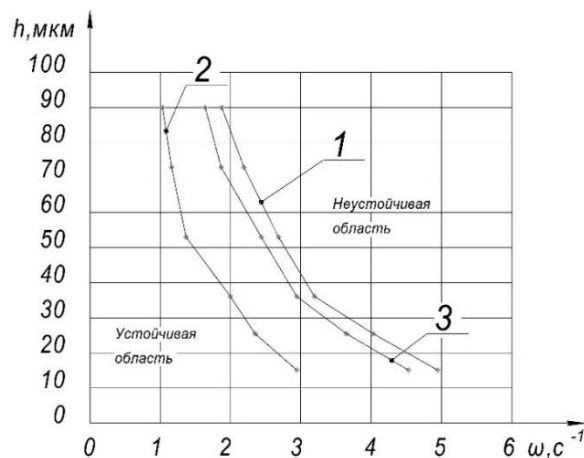


Рисунок 13 – Область устойчивости вала ротора в процессе токарной обработки на ГСО с неполным углом обхвата с числом карманов: 1 – два, 2 – три, 3 – четыре.

Как видно из графиков областей устойчивости (Рисунок 12 и 13), положительное влияние на устойчивость оказывает повышение давления питания. Вариант конструктивного исполнения вкладыша ГСО с неполным углом обхвата с двумя карманами показал наибольший сдвиг области устойчивости в сторону увеличения угловой скорости вращения вала ротора при обработке точением на ГСО с неполным углом обхвата.

Проведенный анализ, и разработанная модель показали, что существенное влияние на жесткость опоры оказывает конструктивные параметры опоры. Наибольшую область устойчивой работы со сдвигом в сторону увеличения угловой скорости вращения вала ротора при обработке показал вариант конструктивного исполнения с двумя карманами подачи рабочей жидкости в опору. Наибольшую жесткость и демпфирование ГСО с неполным углом обхвата в сравнении с двумя другими вариантами конструктивного исполнения опоры показал вариант с двумя карманами. Значения коэффициентов жесткости у рассматриваемого варианта на один порядок выше, чем у других вариантов конструктивного исполнения опоры.

В пятой главе рассматривается влияние конструктивных параметров ГСО с неполным углом обхвата на точность и качество токарной обработки. Проведено исследование влияния конструктивных параметров опоры на производительность токарной обработки методом геометрического программирования.

К основным техническим требованиям процесса механической обработки крупногабаритных валов роторов относятся следующие:

- аксиальные и диаметральные размеры выполняются по седьмому качеству точности, отдельные – по шестому качеству;
- параметр шероховатости поверхностей под посадку дисков $Ra = 1,25$ мкм, остальных участков $Ra = 2,5$ мкм;
- овальность, конусность и не концентричность участков под насадку рабочих колёс и других деталей обычно не должны превышать 0,02 мм;
- торцевое биение по упорному диску и присоединительному фланцу жесткой муфты не должно превышать 0,02 мм, по остальным торцевым уступам 0,03 мм;

Виды обрабатываемого крупногабаритного вала на ГСО с неполным углом обхвата и рассматриваемой опоры представлены на Рисунке 14.



Рисунок 14 – Вид установленного обрабатываемого крупногабаритного вала на ГСО с неполным углом обхвата и вид рассматриваемой опоры

Возникающая суммарная погрешность обработки точением крупногабаритного вала на ГСО с неполным углом обхвата обусловлена следующими отклонениями:

- Изгиб вала под действием силы резания P_y ;
- Смещение шейки вала в ГСО с неполным углом обхвата под действием радиальной составляющей силы резания;
- Изгиб оси вала под действием радиальной составляющей силы резания.

Максимальная суммарная величина отклонений при токарной обработке вала ротора на ГСО с неполным углом обхвата, вызванная упругими деформациями рассматриваемой частью технологической системы (опора – вал) может быть определена как:

$$\Delta_{\Sigma} = \Delta_n + \Delta_m + \Delta_0 = 2(y_n + y_m + y_o). \quad (11)$$

Графики зависимости суммарной погрешности в зависимости от давления подачи масла в опору и разных конструктивных исполнений опорной поверхности вкладыша ГСО с неполным углом обхвата приведены на Рисунке 15.

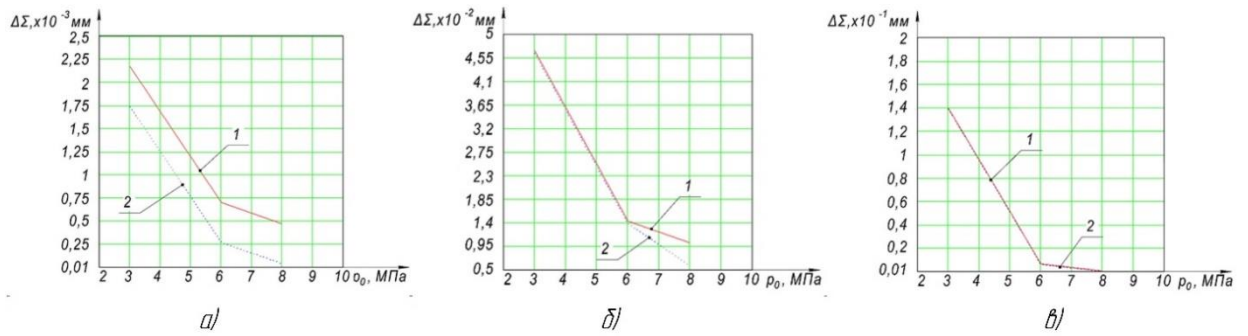


Рисунок 15 – Графики зависимости суммарной погрешности обработки от давления подачи масла в ГСО с неполным углом обхвата с числом карманов: а) – два, б) – три, в) – четыре
 при обработке: 1 – основного диаметра на расстоянии от патрона станка 0,9l, 2 – при обработке в центре вала.

Как видно из Рисунка 15 наименьшее значение суммарной погрешности при точении валов роторов на ГСО с неполным углом обхвата показывает вариант конструктивного исполнения вкладыша с двумя карманами. На уменьшение суммарной погрешности существенное влияние оказывает повышение давления подачи масла p_0 в опору.

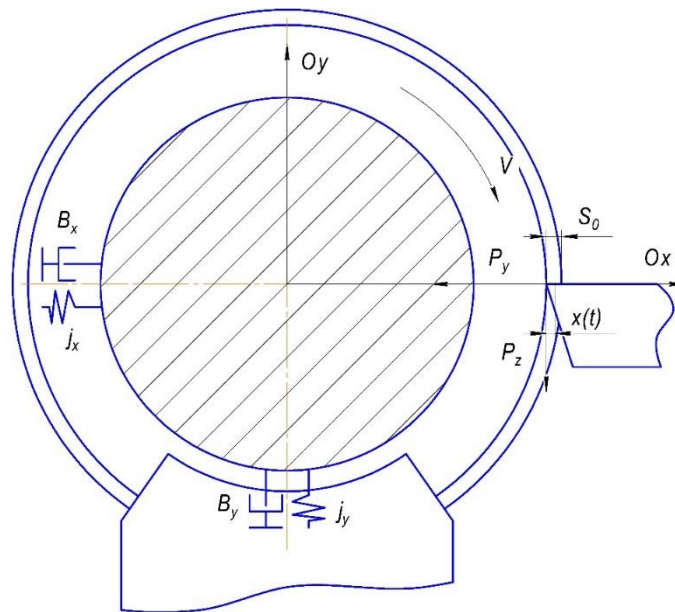


Рисунок 16 – Расчетная схема для определения движения заготовки в зависимости от конструктивного исполнения опорной поверхности вкладыша ГСО с неполным углом обхвата

Динамическое уравнение второго рода для описания движения заготовки имеет следующий вид:

$$m\ddot{Y} + B\dot{Y} + kY = F(t). \tag{12}$$

Решение уравнения (15) имеет следующий вид:

$$x(t) = \frac{m}{j_x - K_y} \left[C_1 \cos \left(\left(\frac{j_x - K_y}{m} \right) t \right) + C_2 \sin \left(\left(\frac{j_x - K_y}{m} \right) t \right) \right] - \frac{K_y S_0}{j_x - K_y}, \quad (13)$$

где: j_x – коэффициент жесткости рассматриваемой системы, K_y – коэффициент для определения динамической толщины срезаемого слоя, S_0 – припуск на обработку, C_1, C_2 – постоянные коэффициенты, определяемые из начальных условий.

Графики изменения рассчитанных перемещений заготовки при обработке точением вала на ГСО с неполным углом обхвата для трех вариантов конструктивного исполнения опоры представлены на Рисунке 17. Рассчитанные основные параметры колебания заготовки вследствие реакции опоры на возникающую силу резания для трех вариантов опор представлены в Таблице 2.

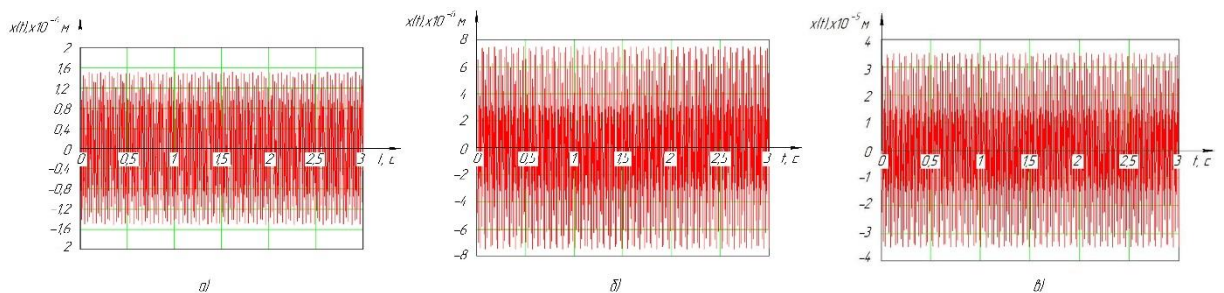


Рисунок 17 – График колебания заготовки в процессе точения крупногабаритного вала ротора при параметрах режима резания: $h_0=1$ мм, $S_0 = 0,1$ мм/об, $V = 60$ м/мин на ГСО с неполным углом обхвата с двумя карманами: а) – два кармана, б) – три кармана, в) – четыре кармана.

Таблица 2 – Параметры процесса автоколебания заготовки в процессе точения

Число карманов, N_K	Амплитуда, A_m , м	Частота колебания, ω , c^{-1}
2	$3,021 \cdot 10^{-6}$	$6,633 \cdot 10^3$
3	$1,497 \cdot 10^{-5}$	$2,967 \cdot 10^3$
4	$7,026 \cdot 10^{-5}$	$0,986 \cdot 10^3$

Исходя из полученных результатов, представленных на Рисунке 17 и в Таблице 2 можно сделать вывод, что вариант конструктивного исполнения с двумя карманами является предпочтительным. Данный вариант обладает меньшей грузоподъемность по сравнению с вариантами с тремя и четырьмя карманами, но показывает наилучшие динамические характеристики по сравнению с двумя другими вариантами.

Шероховатость поверхности после точения определяется по формуле:

$$Ra = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx, \quad (14)$$

где l – длина обработанного участка поверхности вала, $y(x)$ – функция полученного профиля поверхности в процессе точения.

Высота волнистости W_z представляет собой среднее арифметическое значение из пяти значений отклонений, определяемых в пределах пяти равновеликих отдельных участков измерения волнистости как вертикальные расстояния между эквидистантами к средней линии, касающимися измеренного профиля в наивысшей и наименьших точках. Волнистость характеризуется отклонениями значительно большего шага, чем у шероховатости. К волнистости относятся отклонения, у которых отношение $1000 \geq l/y(x) \geq 50$.

Таблица 3 – Показатели качества обработанной поверхности в зависимости от конструктивных параметров ГСО с неполным углом обхвата

Число карманов, N_k	Высота волнистости W_z , мкм	Шероховатость Ra , мкм
2	0,51	0,75
3	3,42	3,39
4	0,95	13,62

Как видно из полученных значений показателей качества обработанной поверхности (Таблица 3) предпочтительным является вариант конструктивного исполнения ГСО с неполным углом обхвата с двумя карманами подачи рабочей жидкости в опору. Данное исполнения обеспечивает лучшие показатели качества обработанной поверхности ($W_z = 0,51$ мкм и $Ra = 0,75$ мкм) в сравнении с двумя другими рассматриваемыми исполнениями в исследовании.

Так как реакции опоры на два порядка выше, чем максимальные значения силы резания при черновом точении крупногабаритных валов, и опора обладает сравнительно высокой жесткостью (для варианта с двумя карманами $j_x = 2 \cdot 10^8$ Н/м) значения колебаний заготовки имеют малый порядок. Для вариантов с тремя и четырьмя карманами подачи масла в опору амплитуды колебания заготовки составили 14,97 мкм и 70,26 мкм, как представлено в Таблице 2. Рассчитанные отклонения заготовки в процессе точения могут негативно повлиять на показатели качества обработанной поверхности вала ротора.

В случае с двумя карманами значение амплитуды отклонения незначительно и составляет 3,02 мкм.

Для решения задачи оптимизации процесса токарной обработки используется один из самых распространённых вариантов – геометрическое программирование (ГП).

Для построения математической модели для определения оптимальных режимов резания при токарной обработке вала на ГСО с неполным углом обхвата были введены следующие ограничения:

1. Ограничение, связанное с режущими возможностями инструмента.
2. Ограничение, связанное с производительностью станка
3. Ограничение на наименьшую допустимую скорость резания.
4. Ограничение на наибольшую допустимую скорость резания.
5. Ограничение на наименьшую допустимую подачу.
6. Ограничение на наибольшую допустимую подачу.
7. Ограничение по прочности режущего инструмента.
8. Ограничение, связанное с жесткостью режущего инструмента.
9. Ограничение, накладываемое жесткостью заготовки
10. Ограничение, связанное с требуемым параметром шероховатости обработанной поверхности.

Путем введения ряда упрощений и без учета изменения глубины резания, стойкости инструмента выражение для определения оптимальной (минимальной) технологической себестоимости операции C_{op} можно представить в виде:

$$C_{op} = \frac{C}{nS}, \quad (15)$$

где C – постоянная величина себестоимости операции, не зависящая от n, S , n, S – коэффициенты отражающие влияние скорости вращения заготовки и подачи на себестоимость токарной обработки.

Система неравенств, состоящая из приведенных технических ограничений, методом логарифмирования принимает следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} x_1 + y_v x_2 \leq b_1 \\ x_1 + x_2 \geq b_2 \\ x_1 \geq b_3 \\ x_1 \leq b_4 \\ x_2 \geq b_5 \\ x_2 \leq b_6 \\ n_{pz} x_1 + y_{pz} x_2 \leq b_7 \\ n_{pz} x_1 + y_{pz} x_2 \leq b_8 \\ n_{py} x_1 + y_{py} x_2 \leq b_9 \\ n_r x_1 + y_r x_2 \leq b_{10} \end{array} \right. . \quad (16)$$

Полученная система неравенств составляет математическую модель процесса токарной обработки крупногабаритного вала на ГСО с неполным углом обхвата. Математическую модель процесса резания можно изобразить в графическом виде (рисунок 18). В этом случае каждое техническое ограничение представляется граничной прямой, которая определяет полуплоскость, где возможно существование решений системы неравенств.

Координаты точки пересечения линии функции оптимизации и границ поля решений неравенств на максимальной длине вектора максимизации и являются решением поиска оптимальных значений параметров резания.

Расчет производился для чистового точения вала ротора со следующими параметрами: максимальным обрабатываемым диаметром вала $D=1600$ мм, длиной заготовки $L = 18000$ мм, высотой профиля резца $H = 50$ мм, шириной профиля резца $B = 30$ мм, припуском $t = 0,5$ мм, материалом резца – твердый сплав ВК8, радиусом скругления вершины режущей кромки $r = 2$ мм, главным углом в плане $\varphi = 60^\circ$, вспомогательным углом в плане $\varphi_1 = 30^\circ$, средней стойкостью инструмента $T = 60$ мин, материал обрабатываемого вала – 20ХЗНМФА.

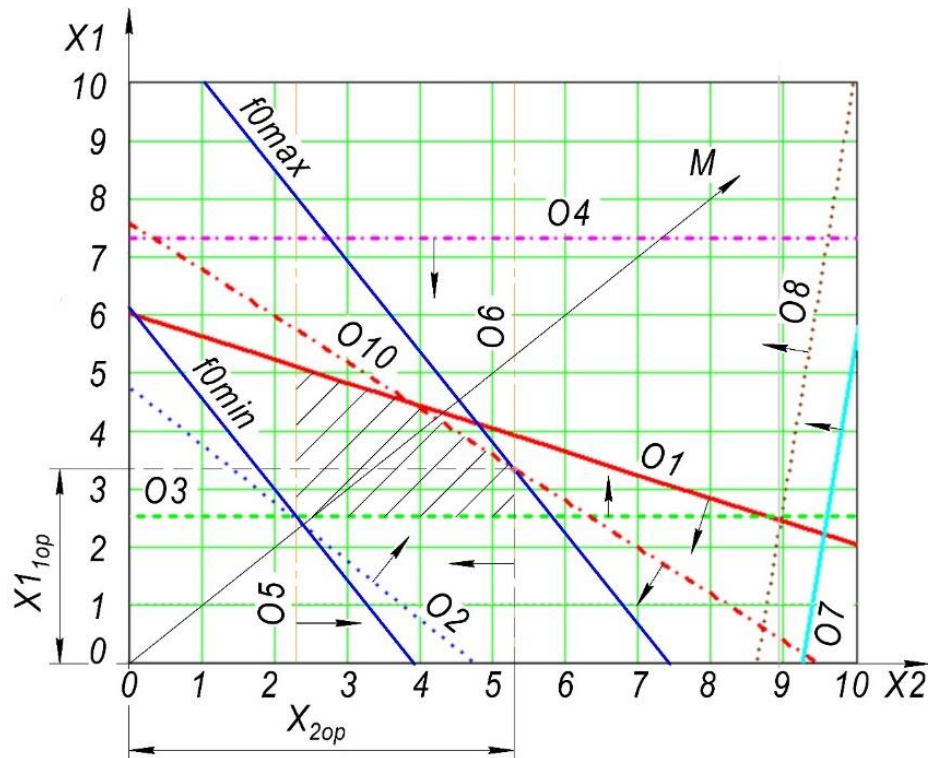


Рисунок 18 – Графическое построение математической модели нахождения оптимальных режимов резания для обработки крупногабаритного вала на ГСО с неполным углом обхвата

Результаты расчета оптимальных режимов резания:

$$n_{op} = \exp x_{1op} = \exp 3,336 = 28,1 \text{ мин}^{-1},$$

$$\omega_{op} = \frac{2\pi}{60} n_{op} = 2,94 \text{ с}^{-1}, v = 88,2 \text{ м/мин},$$

$$S_{op} = \frac{1}{100} \exp x_{2op} = \frac{1}{100} \exp 5,298 = 2 \text{ мм/об.}$$

Как видно из результатов оптимальным значением угловой скорости вращения вала ротора на ГСО с неполным углом обхвата при чистовой обработке является $\omega_{op} = 2,94 \text{ рад}^{-1}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе получены следующие результаты:

1. Разработанные модели и методика показали существенное влияние конструктивных параметров ГСО с неполным углом обхвата на качество и производительность получистовой и чистовой токарной обработки крупногабаритных валов. Для обеспечения требуемого качества изготавливаемых крупногабаритных валов на ГСО с неполным углом обхвата необходимо использовать вариант конструктивного исполнения с двумя карманами подачи рабочей жидкости в опору. Данный вариант обладает наибольшим суммарным значением поля давления, запасом по увеличению скорости резания, большей устойчивостью в сравнении с другими вариантами конструктивного исполнения опор рассматриваемого типа.

2. Разработана методика определения поля давлений в рабочей области ГСО с неполным углом обхвата с учетом изменения теплофизических свойств рабочей жидкости. Определение поля давлений позволяет рассчитать характеристики опоры в зависимости от конструктивного исполнения ГСО с неполным углом обхвата. Наибольшим суммарным значением поля давлений обладает вариант с двумя карманами подачи рабочей жидкости, что обеспечивает устойчивую работу опоры при токарной обработке крупногабаритного вала, уменьшение колебаний и обеспечение требуемой точности обработки.

3. Разработаны рекомендации по выбору конструктивных параметров ГСО с неполным углом обхвата на основе проведенного комплекса вычислительных экспериментов по исследованию влияния конструктивных параметров ГСО с неполным углом обхвата на статические характеристики опоры и на технические параметры обработки точением крупногабаритных валов. Проведенный комплекс вычислительных экспериментов показал существенное преимущество конструктивного варианта с двумя карманами. При скорости вращения заготовки равной 3 с^{-1} грузоподъемность опоры с двумя карманами подачи рабочей жидкости в 1,2 раза выше, чем у других рассматриваемых вариантов, расход в 3 – 4 раза ниже. Это существенно влияет на точность токарной обработки и уменьшение колебаний в процессе эксплуатации опоры. Так же запас по повышению давления подачи рабочей жидкости у данного варианта гарантирует стабильную работу опоры на более высоких скоростях вращения заготовки, что повышает производительность обработки.

4. Разработаны рекомендации по выбору конструктивных параметров ГСО с неполным углом обхвата на основе проведенного комплекса вычислительных экспериментов по исследованию влияния конструктивных параметров опоры на точность

и качество обработки точением. Проведенный комплекс вычислительных экспериментов показал, что существенное влияние на точность токарной обработки оказывают динамические характеристики опоры. Для варианта конструктивного исполнения ГСО с неполным углом обхвата с двумя карманами жесткость опоры на один порядок выше, чем у других рассматриваемых вариантов, что повышает точность механической обработки при использовании данного варианта. Возрастание жесткости с увеличением угловой скорости позволяет увеличить производительность и обеспечить минимизацию колебаний заготовки в процессе эксплуатации ГСО с неполным углом обхвата.

5. Разработаны рекомендации по выбору конструктивных параметров ГСО с неполным углом обхвата на основе проведенного комплекса вычислительных расчетов по исследованию влияния конструктивных параметров опоры на точность, качество и производительность получистовой и чистовой обработки крупногабаритных валов. Анализ погрешности токарной обработки крупногабаритных валов на ГСО с неполным углом обхвата показал, что существенное влияние на точность обработки точением оказывает давление подачи рабочей жидкости в карманы и конструктивное исполнение опоры. При повышении давления подачи с 3 МПа до 8 МПа для варианта с тремя карманами суммарная погрешность обработки уменьшается на один порядок. Вариант конструктивного исполнения рабочей поверхности с двумя карманами обеспечивает значительное снижение погрешности обработки при давлении подачи от 3 до 8 МПа. Анализ влияния конструктивных параметров ГСО с неполным углом обхвата на колебания в процессе обработки точением крупногабаритного вала показал значительное влияние на амплитуду колебаний заготовки. Так для варианта с двумя карманами значение амплитуды $A_m = 3,021 \cdot 10^{-6}$ м, для трех карманов $A_m = 1,497 \cdot 10^{-5}$ м и для четырех $A_m = 7,026 \cdot 10^{-5}$. Значения амплитуды с порядком выше 10^{-5} могут оказать негативное влияние на точность и качество поверхностного слоя обработанной поверхности. Исходя из полученных показателей качества обработанной поверхности предпочтительным является вариант конструктивного исполнения ГСО с неполным углом обхвата с двумя карманами подачи рабочей жидкости в опору. Данное исполнения обеспечивает лучшие показатели качества обработанной поверхности ($W_z = 0,51$ мкм и $Ra = 0,75$ мкм). МГП позволяет определить оптимальные режимы резания для рассматриваемой технологической системы. Для обеспечения требуемого качества обработанного вала на ГСО с неполным углом обхвата на рассчитанных режимах резания ($n_{op} = 28,1$ мин⁻¹, $v = 88,2$ м/мин, $S_{op} = 2$ мм/об) подходящим является вариант с двумя карманами подачи рабочей жидкости в опору.

Для обеспечения всплытия и поддержания зазора в опоре при назначении рассчитанных оптимальных значений параметров токарной обработки крупногабаритных валов на ГСО с неполным углом обхвата и обеспечения требуемого качества изготавливаемого крупногабаритного вала ротора необходимо использовать вариант конструктивного исполнения опоры с двумя карманами.

Результаты работы, представлены и апробированы:

1. Участие в международном конкурсе научных, научно-технических и инновационных разработок, направленных на развитие топливно-энергетической и добывающей отрасли (лауреат третьей премии конкурса).

2. Выступление с докладом и 1 место в секции «Технологии и качество в энергомашиностроении» на X конференции молодых специалистов «Энергия молодости» ПАО «Силовые машины».

Публикации в изданиях, рецензируемых ВАК:

1. Васильев А. А. Динамика токарной обработки валов паровых турбин на гидростатических опорах с неполным углом обхвата // Металлообработка, 2021, № 1, С. 20–25.

2. Васильев А.А. Разработка методики расчета поля давлений для неизотермического течения вязкой жидкости в гидростатических подшипниках при обработке крупногабаритных валов паровых турбин // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2021. № 7. С. 99–106.

3. Васильев А.А. Влияние количества карманов гидростатической опоры с неполным углом обхвата на статические и динамические характеристики // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, 2021. № 5 (349). С. 52–58.

Публикации в других изданиях:

1. Васильев А.А. Определение конструктивных параметров гидростатической опоры с неполным углом обхвата шейки вала // Фундаментальные основы механики. – 2020. – №5. С. 14–20.

2. Васильев А.А. Влияние конструктивного исполнения вкладыша ГСО с неполным углом обхвата на технологические параметры токарной обработки крупногабаритных валов // ISSN 2223-0807. Современное машиностроение: Наука и образование: материалы 11-й Международной научной конференции / Под ред. А.Н. Евграфова и А.А. Поповича. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. С. 331 – 340.