

На правах рукописи



Бешевли Олег Борисович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕХАНИЧЕСКОЙ
ОБРАБОТКИ ОПОРНОЙ ПОВЕРХНОСТИ СКОЛЬЖЕНИЯ
КРУПНОГАБАРИТНЫХ ПОДШИПНИКОВ**

Специальность 05.02.07

Технология и оборудование механической и физико-технической обработки

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Белгород - 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г.Шухова».

Научный руководитель: **Дуюн Татьяна Александровна**
доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Технология машиностроения» ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г.Шухова», г. Белгород

Официальные оппоненты: **Ушаков Михаил Витальевич**
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Инструментальные и метрологические системы» ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет», г. Тула
Кирющенко Евгений Владимирович
кандидат технических наук, зам. начальника отдела ПАО «Новолипецкий металлургический комбинат», г. Липецк

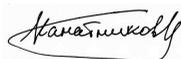
Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь.

Защита состоится «16» мая 2019 г. в 14:00 на заседании объединённого диссертационного совета Д999.115.03 при ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И. С. Тургенева», ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет», ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет» по адресу: г. Орёл, Наугорское шоссе, 29, ауд. 212.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И. С. Тургенева» и на сайте <http://oreluniver.ru/diser>.

Автореферат разослан «__» 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук



Канатников
Никита Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Крупногабаритные подшипники скольжения используются в качестве опорных подшипников шаровых мельниц барабанного типа, широко применяемых в горнорудной промышленности для измельчения рудных материалов и в строительной отрасли при производстве цемента, извести, гипса, керамических изделий.

В зависимости от типоразмера мельницы диаметр подшипника составляет 900-2700 мм, а его конструкция состоит из трех сегментов с углом раскрытия 120° (рис.1). В качестве антифрикционного материала опорной поверхности скольжения применяют баббиты на оловянной и свинцовой основе (Б83, Б88, Б16).



Рис. 1. Сегмент подшипника

Качество опорной поверхности оказывает влияние на надежность и ресурс работы эксплуатируемой мельницы: погрешности формы вызывают дополнительные вибрации, неравномерный износ подшипника, нарушение работы агрегата в целом, шероховатость поверхности формирует условия трения, обуславливая интенсивность процессов износа.

В связи с тяжелыми условиями работы подшипники периодически подвергают восстановительной обработке, выполняемой, как правило, по месту эксплуатации мельницы. Применяемая традиционная технология включает ручное шабрение, имеющее низкую производительность, высокую себестоимость, нестабильное качество, зависящее от квалификации исполнителя. Поэтому разработка и внедрение нового способа механической обработки с использованием переносного станочного модуля даст существенный технико-экономический эффект за счет снижения времени ремонтного простоя мельницы.

Целью работы является повышение производительности и снижение себестоимости при стабильном обеспечении требуемого качества механической обработки опорной поверхности скольжения крупногабаритных подшипников за счет применения нового технологического способа с использованием специального станочного модуля.

Для реализации поставленной цели необходимо решить **следующие задачи:**

1. Провести обоснование нового технологического способа механической обработки опорной поверхности скольжения крупногабаритных подшипников посредством применения специального станочного модуля.

2. Выявить взаимосвязи протекания силовых и тепловых явлений, сопровождающих фрезерование баббита, с технологическими параметрами процесса, установить закономерности формирования качества обрабатываемой поверхности.

3. Определить технологические параметры специального станочного модуля, обеспечивающих заданное качество обрабатываемой поверхности.

4. Определить структурные и кинематические параметры станочного модуля, обеспечивающих высокую производительность процесса при заданном качестве обрабатываемой поверхности.

Тематика работы соответствует следующим пунктам паспорта специальности 05.02.07: п.2 «Теоретические основы, моделирование и методы экспериментального исследования процессов механической и физико-технической обработки, включая процессы комбинированной обработки с наложением различных физических и химических воздействий», п.3 «Исследование механических и физико-технических процессов в целях определения параметров оборудования, агрегатов, механизмов и других комплектующих, обеспечивающих выполнение заданных технологических операций и повышение производительности, качества, экологичности и экономичности обработки», п.5 «Создание, включая исследования, проектирование, расчеты, комплектующих агрегатов и механизмов, обеспечивающих достижение требуемых технологических и технико-экономических параметров оборудования».

Научную новизну составляют:

1. Разработанный комплекс регрессионных моделей процесса фрезерования баббитов на оловянной (Б83) и свинцовой (Б16) основе, устанавливающий связь технологических условий обработки с силовыми и тепловыми параметрами процесса резания и шероховатостью обрабатываемой поверхности, позволяющий определять требуемые параметры обрабатывающего оборудования.

2. Выявленные закономерности протекания силовых и тепловых процессов при фрезеровании баббитов в зависимости от технологических условий: глубины резания, подачи на зуб, ширины фрезерования, диаметра и частоты вращения фрезы.

3. Установленное влияние технологических режимов (подачи на зуб, скорости и глубины резания) при фрезеровании баббитов на формирование шероховатости обрабатываемой поверхности.

Практическую значимость составляют:

1. Разработанная конструкция специального станочного модуля для механической обработки опорной поверхности скольжения крупногабаритных подшипников, позволяющая выполнять обработку по месту эксплуатации агрегата.

2. Предложенные модели и методики расчета структурных, кинематических и динамических параметров станочного модуля для обеспечения требуемых технологических условий обработки.

3. Оптимизационная модель определения технологических режимов, обеспечивающих достижение технико-экономических параметров процесса фрезерования с использованием специального станочного модуля.

Методы исследования. Теоретические исследования базируются на научных основах технологии машиностроения, теории резания, теории механизмов и машин, теоретической механики, методов математического моделирования и оптимизации.

Экспериментальные исследования выполнены с использованием методов планирования эксперимента, современного оборудования и контрольно-измерительных средств.

Достоверность подтверждается результатами проведенных экспериментальных исследований, выполненных на аттестованном оборудовании, их высокой воспроизводимостью, соответствием теоретических и экспериментальных данных, ясностью физической трактовки результатов.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались на международных и всероссийских научно-технических конференциях: «Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова», г. Белгород, 2012, 2013 г.г.; «Технические науки в мире: от теории к практике» г. Ростов-на-Дону, 2015 г.; «Новая наука: проблемы и перспективы» г. Стерлитамак, 2015 г.; «Проблемы и перспективы технических наук» г. Уфа, 2015 г.; «Образование, наука, производство» г. Белгород, 2015 г.; «Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении» г. Севастополь, 2015, 2016 г.г.

Реализация и внедрение результатов работы. Внедрение результатов работы осуществлено в ЗАО «Оскольский завод металлургического машиностроения», подтверждено актом внедрения.

Публикации. По результатам работы опубликовано 17 печатных работ, в том числе 7 в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 1 – в зарубежном издании, входящем в список Scopus, получено два патента РФ на полезную модель.

Структура и объём работы: диссертационная работа состоит из введения, четырех глав. Работа включает 169 страниц, в том числе 138 страниц основного текста, 34 таблицы, 54 рисунка, список литературы из 126 наименований и 4 приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснованы актуальность темы диссертации, изложены основные положения, выносимые на защиту, определены научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе выполнен анализ конструктивных особенностей и условий эксплуатации крупногабаритных подшипников скольжения, установлено, что параметры качества опорной поверхности скольжения оказывают существенное влияние на надежность их работы. Проведен

сравнительный анализ традиционных методов восстановительной обработки опорной поверхности, выявлены недостатки, основными из которых являются нестабильное качество, низкая производительность и высокая себестоимость.

Проблеме технологического обеспечения качества изделий, повышению эффективности и оптимизации технологических процессов в технологии машиностроения уделяется значительное внимание. Указанные выше вопросы в соответствующей конкретной постановке решаются в работах Дальского А.М., Соколовского А.П., Колева К.С., Рыжова А.В., Силина С.С., Сулова, Соломенцева Ю.М., Аверченкова В.И., Макарова А.Д. и многих других.

Однако в опубликованных работах не рассматриваются особенности технологических условий обработки баббитов, поэтому основной задачей исследования является их выявление с целью разработки нового более производительного способа механической обработки опорной поверхности скольжения крупногабаритных подшипников с применением специального станочного модуля.

Вторая глава посвящена выявлению взаимосвязей протекания силовых и тепловых явлений, сопровождающих фрезерование баббитов на оловянной и свинцовой основе, с технологическими условиями процесса обработки, определению закономерностей формирования шероховатости обрабатываемой поверхности.

Для обоснования прочностных свойств разрабатываемой конструкции станочного модуля, параметров жесткости технологической системы, требуемой мощности привода главного движения проведены экспериментальные исследования (полуреплика 2^{5-1} от полнофакторного эксперимента 2^5 , 16 опытов) по измерению составляющих силы резания при фрезеровании баббита с использованием многоканального пьезоэлектрического динамометра KISTLER TYPE5070A. По результатам получена зависимость (1) тангенциальной составляющей силы резания от технологических условий: глубины резани, подачи на зуб, ширины фрезерования, диаметра и частоты вращения фрезы (рис.2):

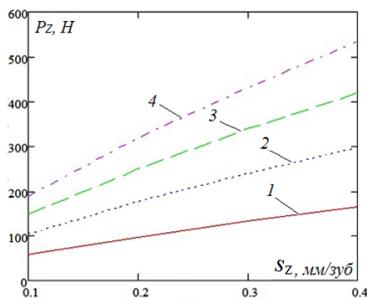


Рис. 2. Тангенциальная составляющая силы резания при фрезеровании баббита ($D=60$ мм, $B=48$ мм, $n=750$ об/мин, $s_z=0,1-0,4$ мм/зуб) 1 – $t=1$ мм; 2 – $t=2$ мм; 3 – $t=3$ мм; 4 – $t=4$ мм

$$P_z = 336 \frac{t^{0,85} s_z^{0,75} B}{n^{0,1} D^{0,8}}, \quad (1)$$

где P_z – тангенциальная составляющая силы резания; t – глубина резания, мм; s_z – подача на зуб, мм/зуб; B – ширина фрезерования, мм; D – диаметр фрезы, мм; n – частота вращения фрезы, об/мин.

Для анализируемых технологических условий тангенциальная составляющая силы резания лежит в интервале 50-500 Н, а максимальная мощность не превышает 1,5 кВт.

Температура резания при обработке баббитов является одним из ключевых факторов, влияющих на формирование микрорельефа обрабатываемой поверхности, так как обуславливает процессы наростообразования в силу низкой температуры начала плавления (240°C). Были проведены экспериментальные исследования теплового поля в зоне фрезерования в зависимости от технологических параметров с использованием тепловизора TVS 110. По результатам проведенного эксперимента (использовался план, аналогичный исследованию силы резания) получены зависимости температуры резания от технологических параметров (глубины резани, подачи на зуб, ширины фрезерования, диаметра и частоты вращения фрезы) для баббитов на оловянной (2) и свинцовой (3) основе:

$$Tr = 33 \frac{t^{0,47} s_z^{0,57} B^{0,95} \cdot n^{0,38}}{D}, \quad (2)$$

$$Tr = 4,22 \frac{t^{0,29} s_z^{0,5} B \cdot n^{0,6}}{D^{1,08}}, \quad (3)$$

где Tr – температура резания; t – глубина резания, мм; s_z – подача на зуб, мм/зуб; B – ширина фрезерования, мм; D – диаметр фрезы, мм, n – частота вращения фрезы, об/мин.

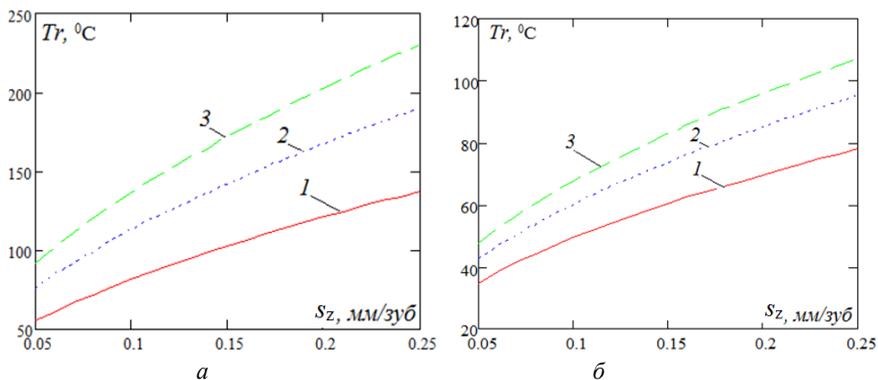


Рис. 3. Температура резания при фрезеровании баббита $D=50$ мм, $B=40$ мм, $n=1000$ об/мин, $s_z=0,05-0,25$ мм/зуб, 1 – $t=1$ мм; 2 – $t=2$ мм; 3 – $t=3$ мм: а – баббит на оловянной основе (B83), б – баббит на свинцовой основе (B16)

Температура резания для свинцовых баббитов лежит в допустимом диапазоне, не превышая 110°C (рис.3,4 б), обработка оловянных баббитов характеризуется большими температурами резания, достигая предельных значений начала расплавления 240°C (рис.3,4 а).

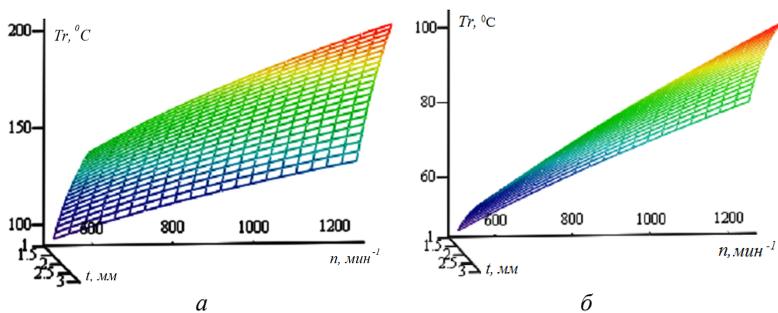


Рис. 4. Изменение температуры резания при фрезеровании баббита от глубины резания и частоты вращения при $D=50$ мм, $B=40$ мм, $s_z=0,2$ мм/зуб: *a* – баббит на оловянной основе (Б83), *б* – баббит на свинцовой основе (Б16)

Микрорельеф поверхности скольжения подшипника формирует условия трения, оказывая существенное влияние на процессы износа, поэтому выполнены экспериментальные исследования с целью выявления влияния технологических режимов обработки (подачи на зуб s_z , скорости v и глубины резания t) на формирование шероховатости обрабатываемой поверхности. По результатам использования центрального композиционного плана второго порядка получены следующие зависимости (рис.4, 5):

для баббита Б16

$$Ra(s_z, v, t) = 8,35 - 6,7 \cdot 10^{-3} v + 11,26 s_z - 3,8 t + 3,33 \cdot 10^{-2} v s_z - 0,61 s_z t + 3 \cdot 10^{-4} v^2 + 8,2 s_z^2 + 1,3 t^2 \quad (4)$$

для баббита Б83

$$Ra(s_z, v, t) = 12,625 - 0,78 v + 10,5 s_z - 5,3 t + 5,4 \cdot 10^{-2} v s_z - 9,5 \cdot 10^{-3} v t + 3,8 \cdot 10^{-4} v^2 + 7,1 s_z^2 + 1,4 t^2 \quad (5)$$

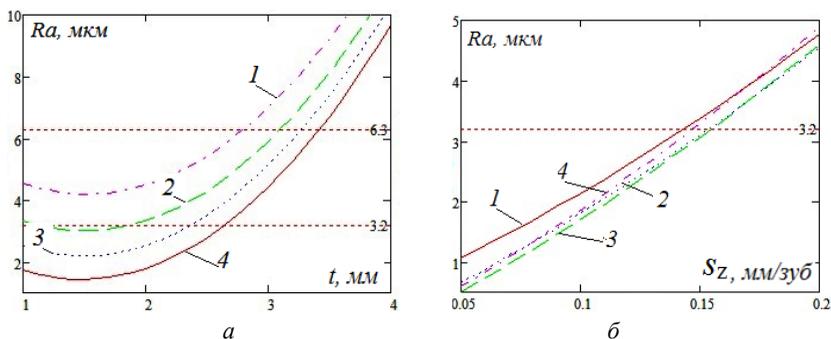


Рис. 5. Шероховатость поверхности при фрезеровании баббита Б16: *a* – $v=105$ м/мин, 1 – $s_z=0,2$ мм/зуб; 2 – $s_z=0,16$ мм/зуб; 3 – $s_z=0,13$ мм/зуб; 4 – $s_z=0,1$ мм/зуб; *б* – $t=1$ мм, 1 – $v=75$ м/мин; 2 – $v=95$ м/мин; 3 – $s_z=v=115$ м/мин; 4 – $v=135$ м/мин

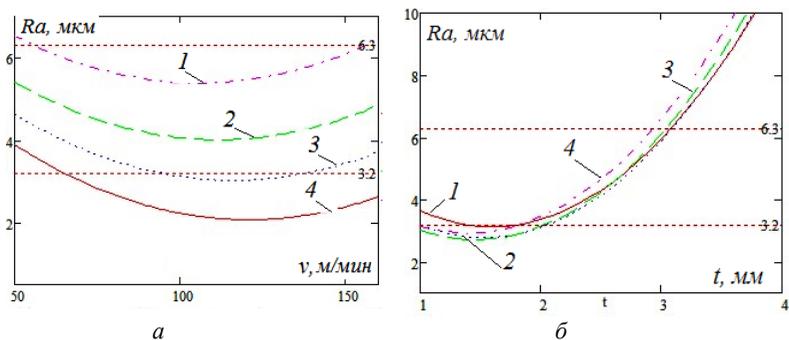


Рис. 6. Шероховатость поверхности при фрезеровании баббита Б83: $a - t=1$ мм, $1 - s_z=0,2$ мм/зуб; $2 - s_z=0,16$ мм/зуб; $3 - s_z=0,13$ мм/зуб; $4 - s_z=0,1$ мм/зуб; $b - s_z=0,13$ мм/зуб, $1 - v=75$ м/мин; $2 - v=95$ м/мин; $3 - s_z = v=105$ м/мин; $4 - v=135$ м/мин

Наибольшее влияние на шероховатость поверхности оказывают подача и глубина резания: влияние подачи близко к линейному виду, влияние глубины резания имеет явно выраженный экстремум, скорость резания не оказывает существенного влияния. Характер формирования шероховатости в зависимости от технологических режимов для оловянных и свинцовых баббитов не имеет существенных отличий, значения шероховатости для баббита Б83 несколько больше по сравнению с Б16.

Третья глава посвящена проектированию специального станочного модуля для обработки опорной поверхности крупногабаритных подшипников, определению его структурных, кинематических и динамических параметров с целью достижения требуемых технологических режимов обработки, обеспечивающих заданное качество обрабатываемой поверхности.

Особенностью предлагаемого станочного модуля является перемещение инструмента по радиальной поверхности сегмента крупногабаритного подшипника скольжения. Кинематически движение продольной подачи реализовано с использованием четырехзвенного кривошипно-кулисного механизма. Вращательное движение кривошипу передается от электродвигателя через редуктор. Кулиса и коромысло преобразуют вращательное движение кривошипа в качательное движение стойки коромысла, на которой расположен режущий инструмент – фреза.

За один полный оборот кривошипа режущий инструмент совершает один рабочий и один холостой ход, возвращаясь в исходное положение. Движение поперечной подачи осуществляется в конце полного цикла работы механизма – рабочего и холостого хода. Для отвода инструмента и выполнения поперечной подачи использованы шаговые электродвигатели, которые включаются при пересечении фрезы с лучом лазерных датчиков. Главное движение – вращение фрезы вокруг собственной оси осуществляется асинхронным электродвигателем.

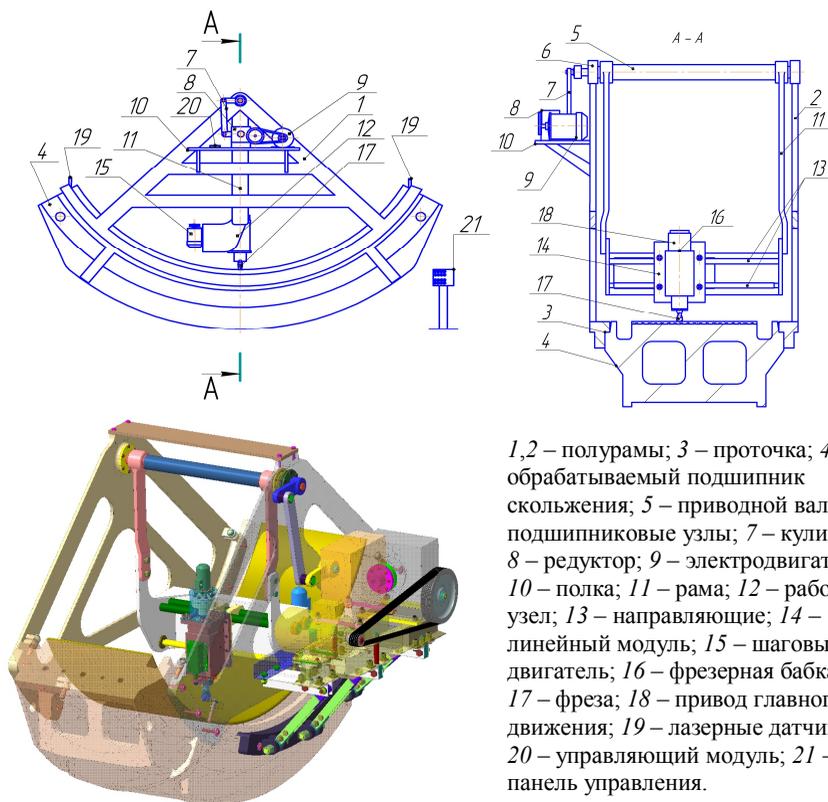


Рис.7. Конструктивная схема и общий вид станка

Выполнение опорных элементов в виде специальных проточек, соответствующих проточкам подшипника скольжения позволяет совместить ось сектора подшипника скольжения и ось вращения качающейся рамы, что обеспечивает точность обработки.

Для обеспечения требуемых технологических условий процесса фрезерования проведен структурный и кинематический анализ исполнительного кривошипно-кулисного механизма, расчетная схема которого представлена на рис.8.

Выполнена минимизация размеров звеньев исполнительного механизма при условии его работоспособности в крайних рабочих положениях кривошипа ($\gamma = 0^\circ$, $\gamma = 180^\circ$) с целью обеспечения возможности его использования при обработке подшипников различных диаметров.

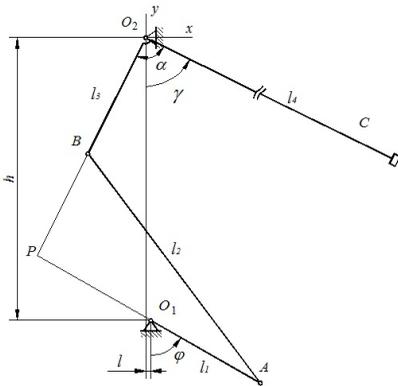


Рис.8. Расчетная схема кривошипно-кулисного механизма

С целью обеспечения необходимого вылета режущего инструмента за пределы обрабатываемой поверхности определен угол α при вершине коромысла, от значения которого зависит угол качания звена l_4 с режущим инструментом (расчетная схема рис. 9):

$$\delta\gamma = \frac{a}{2l_4}, \gamma_m = \gamma_p + \delta\gamma,$$

$$\gamma_a, \gamma_i > \gamma_m.$$

Принят угол $\alpha=92^0$, который обеспечивает вылет режущего инструмента, равный 18^0 с обеих сторон, что является достаточным для осуществления перемещения инструмента на величину поперечной подачи и его отвода (подвода).

Величина подачи режущего инструмента кинематически зависит от скорости его перемещения относительно обрабатываемой поверхности. Данная скорость v_C рассчитывалась как функция угла поворота кривошипа φ с использованием мгновенного центра скоростей в аналитической форме:

$$v_C = \omega \frac{BP}{AP} \frac{l_1 \cdot l_4}{l_3}, \begin{cases} AP = \sqrt{(x_A - x_P)^2 + (y_A - y_P)^2} \\ BP = \sqrt{(x_B - x_P)^2 + (y_B - y_P)^2} \end{cases}, \begin{cases} x_A = l + l_1 \sin \varphi \\ y_A = -h - l_1 \cos \varphi \end{cases}, \quad (7)$$

$$\begin{aligned} (l_3 + l_2) - l_1 &> h, \\ (l_1 + l_2) - l_3 &> h, \\ l_3 &> l_1 \\ l_2 &> h \end{aligned} \quad (6)$$

Определены размеры звеньев $l=5$ мм, $l_1=120$ мм, $l_2=274$ мм, $l_3=124$ мм, $h=269$ мм, позволяющие применять механизм в станочных модулях для обработки подшипников диаметром 800-2700 мм. Регулировочным звеном является звено l_4 , длина которого определяется радиусом обрабатываемого вкладыша подшипника.

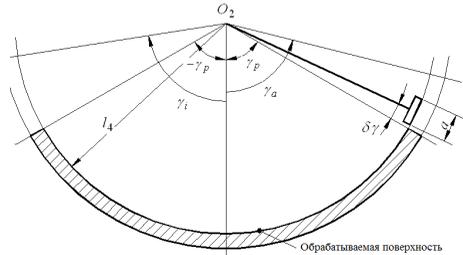


Рис. 9. Определение угла выхода фрезы за пределы обрабатываемой поверхности

$$\left\{ \begin{array}{l} x_B = \frac{A x_A - \sqrt{A^2 x_A^2 - (x_A^2 + y_A^2) (A^2 - y_A^2 l_3^2)}}{x_A^2 + y_A^2} \\ y_B = \frac{A - x_A x_B}{y_A} \end{array} \right\}, \left\{ \begin{array}{l} x_P = \frac{(h x_A + l y_A) x_B}{y_B (l - x_A) + x_B (h + y_A)}, \quad A = \frac{1}{2} (l_3^2 - l_2^2 + x_A^2 + y_A^2) \\ y_P = \frac{y_B}{x_B} x_P \end{array} \right.$$

Для расчета координат режущего инструмента x_C, y_C были получены выражения:

$$\left\{ \begin{array}{l} y_C = -\frac{|k| l_4}{\sqrt{1+k^2}} \\ x_C = \frac{y_C}{k} \end{array} \right., \quad k = \frac{x_B \operatorname{tg} \alpha + y_B}{x_B - y_B \operatorname{tg} \alpha}. \quad (8)$$

где ω – угловая скорость вращения кривошипа O_1A .

С использованием представленных зависимостей вычислены координаты и скорость перемещения режущего инструмента относительно обработанной поверхности. На графике рис.9 отчетливо видны этапы рабочего хода и холостого перемещения инструмента в зависимости от угла поворота кривошипа: на участке угла поворота 0^0-195^0 выполняется быстрое перемещение холостого хода, на участке угла поворота 195^0-360^0 – движение с рабочей подачей.

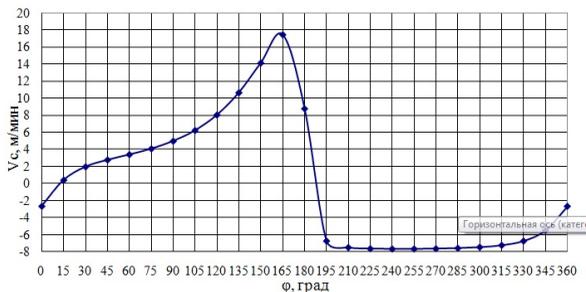


Рис.9. Относительная скорость перемещения режущего инструмента в зависимости от угла поворота кривошипа

Постоянное значение скорости перемещения на этапе рабочего хода обеспечивает стабильность процесса резания. Увеличение скорости перемещения на этапе холостого хода обеспечит повышение производительности.

Результаты кинематического расчета исполнительного механизма использованы для построения имитационной модели и виртуального прототипа в среде MSC Adams с целью кинематического и динамического анализа. Модель, представленная на рис. 10, состоит из четырех твердых тел в соответствии с расчетной схемой (рис.8). В качестве внешних сил заданы силы сопротивления в поворотных шарнирах, а в точке C приложена сила резания F , направленная по нормали к звену O_2C .

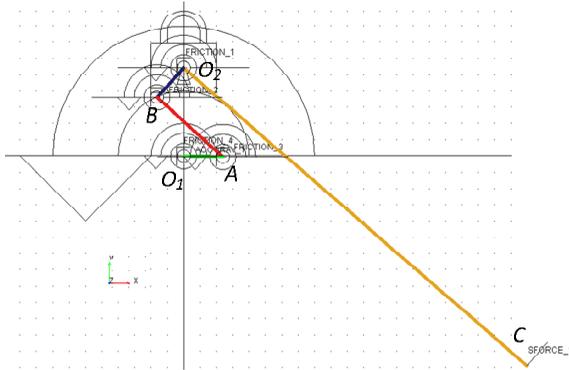


Рис. 10. Компьютерная модель механизма станка в среде MSC Adams с наложенными связями и движением

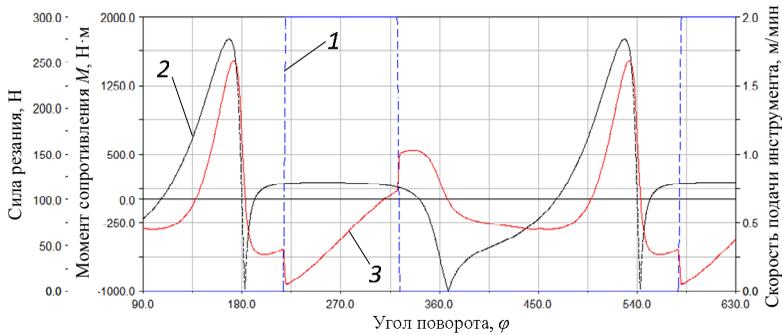


Рис. 11. Результаты моделирования механизма в среде MSC Adams: 1 – сила резания; 2 – скорость перемещения инструмента; 3 – момент сопротивления

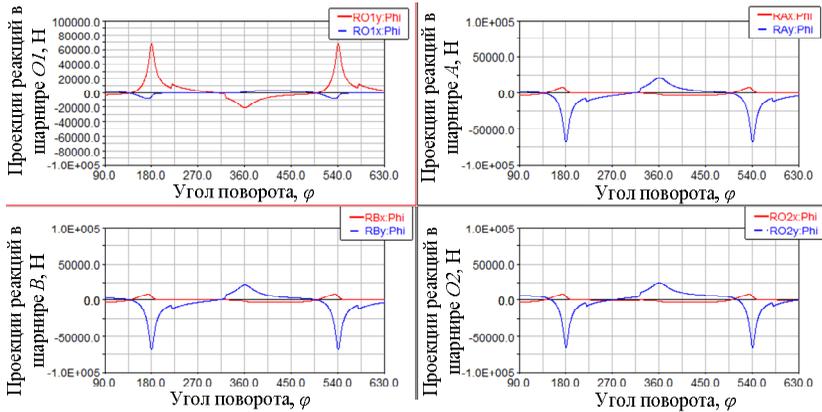


Рис. 12. Графики проекций динамических реакций в соответствующих шарнирах механизма станка

В результате динамического анализа механизма были найдены силомоментные характеристики: момент сопротивления M , который необходимо преодолевать для того, чтобы поддерживать постоянную скорость вращения на валу кривошипа (рис. 11), и динамические реакции в шарнирах опор (рис. 12). Как видно, пиковые значения реакций наблюдаются при углах поворота кривошипа 180° и 360° , а их уровень свидетельствует об ударном характере воздействия. Полученные результаты расчета момента сопротивления позволяют обосновать выбор электропривода и редуктора с учетом необходимого запаса по мощности, а динамические реакции в шарнирах – выбор подшипников.

В четвертой главе разработана оптимизационная модель, обеспечивающая повышение производительности и снижение себестоимости обработки опорной поверхности крупногабаритных подшипников при стабильном обеспечении качества обрабатываемой поверхности за счет оптимизации технологических параметров специального станочного модуля.

На рис. 13 представлена схема структурных элементов оптимизационной модели. Оптимизируемые параметры: подача на зуб и скорость резания, выраженная через частоту вращения фрезы, оказывающие наибольшее влияние на производительность обработки. Подача существенно влияет на шероховатость поверхности и мощность резания, а скорость резания определяет стойкость инструмента. Входными параметрами являются условия резания (диаметр фрезы, количество зубьев, ширина фрезерования, глубина резания) и конструктивные параметры обрабатываемого сегмента подшипника (диаметр и ширина). Технические ограничения: допустимая температура резания, заданная шероховатость, обеспечиваемая на выполняемом переходе, мощность привода главного движения, заданная стойкость инструмента. Выходные параметры – время обработки, эффективная мощность резания, фактическая температура резания.

Оптимизация выполняется в два этапа: на первом решается система неравенств (9), а на втором – полученные значения корректируются с учетом обеспечения шероховатости поверхности по выражениям (4), (5).

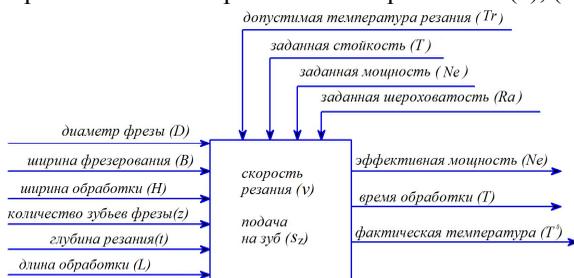


Рис. 13. Схема структурных элементов оптимизационной модели

В качестве метода оптимизации принят метод линейного программирования. Оптимизационная модель представлена в виде системы неравенств (слева – баббит Б16, справа – баббит Б83):

$$\left\{ \begin{array}{l} 0,75 \cdot x_1 + 0,9 \cdot x_2 \leq b_1, \\ 0,4 \cdot x_1 + x_2 \leq b_2, \\ x_1 + x_2 \geq b_3, \\ 0,5 \cdot x_1 - 0,6 \cdot x_2 \leq b_4, \\ \ln(s_{z_{\min}} \cdot 100) \leq x_1 \leq \ln(s_{z_{\max}} \cdot 100), \\ \ln(n_{\min}) \leq x_2 \leq \ln(n_{\max}), \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} 0,75 \cdot x_1 + 0,9 \cdot x_2 \leq b_1, \\ 0,4 \cdot x_1 + x_2 \leq b_2, \\ x_1 + x_2 \geq b_3, \\ 0,57 \cdot x_1 - 0,38 \cdot x_2 \leq b_4, \\ \ln(s_{z_{\min}} \cdot 100) \leq x_1 \leq \ln(s_{z_{\max}} \cdot 100), \\ \ln(n_{\min}) \leq x_2 \leq \ln(n_{\max}), \end{array} \right. \quad (9)$$

где

$$b_1 = \ln\left(\frac{Ne \cdot 100^{0,75}}{1,72 \cdot 10^{-5} \cdot t^{0,85} \cdot B \cdot D^{0,2}}\right), \quad b_2 = \ln\left(\frac{3,092 \cdot 10^5}{D^{0,75} \cdot T^{0,2} \cdot t^{0,1} \cdot B^{0,15} \cdot z^{0,1}}\right),$$

$$b_3 = \ln\left(\frac{H \cdot L \cdot 100}{T \cdot z \cdot B}\right), \quad x_1 = \ln(100s_z), \quad x_2 = \ln(n)$$

$$b_4 = \ln\left(\frac{Tr \cdot D^{0,9} \cdot 100^{0,05}}{4,22 \cdot t^{0,29} \cdot B}\right) - \text{баббит Б16}, \quad b_4 = \ln\left(\frac{Tr \cdot D^{0,9} \cdot 100^{0,05}}{4,22 \cdot t^{0,29} \cdot B}\right) - \text{баббит Б83},$$

целевая функция имеет вид:

$$f(x_1, x_2) = x_1 + x_2 \rightarrow \max$$

Первое неравенство системы устанавливает связь между оптимизируемыми параметрами и эффективной мощностью резания, второе связано с режущими возможностями инструмента, регламентируя заданную стойкость, третье неравенство регулирует время обработки, ограничивая время работы фрезы периодом стойкости, четвертое неравенство контролирует допустимую температуру в зоне резания. На рис. 14 представлен пример графического представления оптимизации для подшипника диаметром 2400 мм.

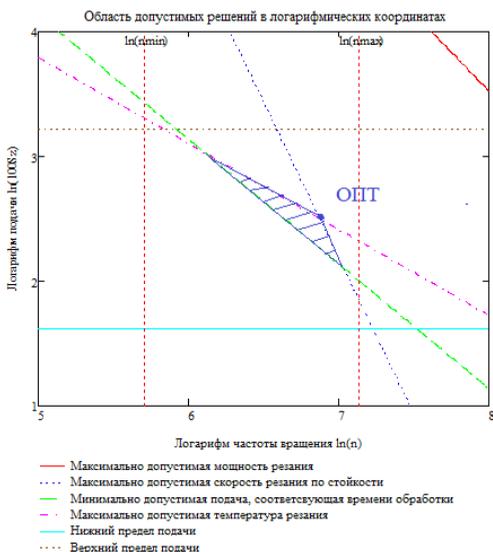


Рис. 14. Графическое представление оптимизации, баббит Б83, чистовой переход

Результаты оптимизации для одного из типоразмеров крупногабаритного подшипника представлены в табл.1

Таблица 1

Результаты оптимизации технологических параметров фрезерования

Параметры подшипника, мм			Переход	Глубина резания, t , мм	Ra , мкм	Скорость резания, м/мин		Подача на зуб, s_z , мм/зуб	Частота вращ., об/мин	Сила резания, P_z , Н	Мощность, кВт	Температура резания, °С	Время работы фрезы, мин
D	B	L				факт.	доп.						
1200	770	1257	черн.	3	8,5	117	118	0,245	934	251	0,48	104	44
			получ.	2	6,3	122	122	0,251	973	181	0,36	96	41
			чист.	1	3,2	131	161	0,149	1043	67	0,15	63	65

На основании полученных оптимальных режимов выполнен расчет экономической эффективности предложенной технологии с применением специального станочного модуля, в результате которого выявлен значительный технико-экономический эффект. Существенно снижается общее время обработки, например, для подшипника диаметром 1400 мм и шириной 860 мм: со 110 до 14 часов, что сокращает время ремонтного простоя эксплуатируемого агрегата. Себестоимость обработки снижается в среднем на 20% за счет сокращения времени ее выполнения и снижения заработной платы основных рабочих.

Основные результаты и выводы

В работе изложены новые научно обоснованные технические и технологические решения создания специального станочного модуля и способа механической обработки опорной поверхности скольжения крупногабаритных подшипников, обеспечивающие высокую эффективность обработки за счет повышения производительности при стабильном достижении качества обрабатываемой поверхности. Основные научные и практические результаты заключаются в следующем:

1. Предложен новый способ механической обработки опорной поверхности крупногабаритных подшипников скольжения с применением разработанного патентно-защищенного специального станочного модуля, позволяющий существенно повысить производительность обработки и снизить ее себестоимость (достигается сокращение времени обработки в 2-5 раз и снижение себестоимости на 20%).

2. Установлены закономерности протекания силовых и тепловых явлений, сопровождающих фрезерование баббита, и выявлена их взаимосвязь с технологическими параметрами процесса, разработаны математические модели тангенциальной составляющей силы резания и температуры резания, определены диапазоны их изменения, что позволяет обосновать технологические параметры механической обработки (выражения 1-3).

3. Выявлены взаимосвязи технологических параметров фрезерования баббитов на оловянной (Б83) и свинцовой (Б16) основе с качеством обрабатываемой поверхности, разработаны математические выражения в виде уравнений регрессии, позволяющие прогнозировать получаемую шероховатость поверхности (выражения 4-5).

4. На основании установленных закономерностей протекания процесса механической обработки баббита и формирования качества обрабатываемой поверхности обоснованы необходимые технологические параметры специального станочного модуля.

5. Предложены модели и методики расчета, с использованием которых выполнен кинематический и динамический анализ исполнительного механизма специального станочного модуля и определены его конструктивные параметры, обеспечивающие заданные условия обработки в соответствии с предъявляемыми требованиями.

6. Предложена оптимизационная модель для назначения технологических режимов, обеспечивающих достижение технико-экономических параметров процесса фрезерования с использованием специального станочного модуля (система уравнений и неравенств 9).

Рекомендации. Результаты теоретических и экспериментальных исследований рекомендуются для промышленного применения при восстановительной и ремонтной обработке крупногабаритных подшипников скольжения по месту их эксплуатации.

Перспективы дальнейшей разработки темы заключаются в совершенствовании и унификации конструктивных элементов предложенного станочного модуля с целью применения для широкого диапазона типоразмеров крупногабаритных подшипников.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

Публикации в изданиях, включенных в перечень ВАК РФ:

1. Бешевли О.Б. Оптимизация технологических режимов фрезерования баббита с использованием станочного модуля для обработки крупногабаритных подшипников / О.Б. Бешевли, Т.А. Дуюн // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2018. – №4. – С.102-108.
2. Бешевли О.Б. Имитационное моделирование динамических характеристик модуля для обработки крупногабаритных подшипников скольжения / О.Б. Бешевли, Д.А. Бушуев, Т.А. Дуюн, В.Г. Рубанов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2017. – №8. – С.149-156.
3. Бешевли О.Б. Эмпирические модели шероховатости поверхности при фрезеровании баббита / Т.А. Дуюн, О.Б. Бешевли // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2016. – №7. – С.122-128.
- 4.

5. Бешевли О.Б. Оптимизация технологических параметров при фрезеровании баббита в условиях ремонтной обработки опорной поверхности скольжения крупногабаритных подшипников / Т.А. Дуюн, О.Б. Бешевли // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2016. – №8. – С.142-147.
6. Лозовая С.Ю. Обеспечение технологических параметров фрезерования баббита при ремонтной обработке крупногабаритных подшипников скольжения / С.Ю. Лозовая, О.Б. Бешевли, Т.А. Дуюн, Н.Д. Воробьев // Фундаментальные исследования. – 2016. – №9. – С. 273-278.
7. Лозовая С.Ю. Повышение эффективности ремонтной обработки опорных узлов крупногабаритных вращающихся агрегатов / С.Ю. Лозовая, О.Б. Бешевли, Т.А. Дуюн, Н.Д. Воробьев // Вестник ИрГТУ. – 2015. – №7. – С 60-66.
8. Дуюн Т.А. Влияние технологических параметров на температурный режим и получаемое качество поверхности при фрезеровании баббитов / Т.А. Дуюн, О.Б. Бешевли // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2015. – №2. – С. 112-117.

Публикации в журналах из списка Scopus:

8. Duganov V.Y. Providing of Axis Alignment Accuracy of Rotary Kilns During the Repair Process / V.Y. Duganov, O.B. Besheveli, M.S. Shepchurov, D.A. Pogonin, N.A. Arkhipova // Advances in Environmental Biology. – 2014. – vol. 8(13). – pp.360-366.

Статьи и материалы конференций, опубликованные в других изданиях

9. Дуюн Т.А. Оптимизация технологических режимов фрезерования поверхности скольжения крупногабаритных подшипников с использованием специального оборудования / Т.А. Дуюн, О.Б. Бешевли // Вестник современных технологий: сборник научных трудов международной конференции «Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении». – 2016. – №4 (4). – С. 40-46.
10. Бешевли О.Б. Моделирование теплового состояния баббита в процессе фрезерования / О.Б. Бешевли, К.В. Чуев // Сборник трудов конференции «VII Международный молодежный форум «Образование, наука, производство» Белгоорд». – 2015. – С. 1768-1772.
11. Дуюн Т.А. Особенности теплового состояния баббитов при механической обработке / Т.А. Дуюн, О.Б. Бешевли // Междисциплинарные подходы в материаловедении и технологии. Теория и практика: сб. трудов Всероссийского совещания заведующих кафедрами материаловедения и технологии материалов. – 2015. – С. 29-34.
12. Дуюн Т.А. Зависимость температуры в зоне резания и качества обработанной поверхности от режимов резания при фрезеровании баббитов

различных марок / Т.А. Дуюн, О.Б. Бешевли // Сборник трудов международной научно-технической конференции «Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении». – 2015. – С. 31-34.

13. Бешевли О.Б. Повышение качества ремонтной обработки баббитовых вкладышей крупногабаритных подшипников скольжения / О.Б. Бешевли // Символ науки. – 2015. – №8. – С. 34-39.

14. Бешевли О.Б. Альтернативный способ ремонтной обработки крупногабаритных подшипников скольжения / О.Б. Бешевли // Материалы международной научно-практической конференции «Проблемы и перспективы технических наук» – 2015. С. 3-5.

15. Бешевли О.Б. Оборудование для повышения производительности при ремонте мельниц / О.Б. Бешевли // Материалы международной научно-практической конференции «Новая наука: проблемы и перспективы» – 2015. – С. 104-106.

16. Бешевли О.Б. Разработка расчетной схемы оборудования для ремонтной обработки крупногабаритных подшипников скольжения / О.Б. Бешевли // Материалы международной научно-практической конференции «Технические науки в мире: от теории к практике». – 2015. – С. 38-42.

17. Бешевли О.Б. Станок для обработки внутренних цилиндрических поверхностей крупногабаритных подшипников скольжения мельниц самоизмельчения / О.Б. Бешевли, В.Я. Дуганов // Материалы международной научно-технической конференции молодых ученых. – 2013. – С. 52-56.

Объекты интеллектуальной собственности:

18. Станок для обработки вкладышей крупногабаритных подшипников скольжения: пат. 132012 Рос. федерация: МПК7 В23D 1/20, В23D 9/00 / Дуганов В.Я., Бешевли О.Б. и др.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО Белгородский гос-й технологический ун-т им. В.Г. Шухова. – № 2013100863/02; заяв. 09.01.13; опубл. 10.09.2013 Бюл. №25.

19. Станок для фрезерования баббитовых вкладышей крупногабаритных подшипников скольжения: пат. 169070 Рос. федерация: МПК, В23С 1/20/ Дуганов В.Я., Бешевли О.Б., Дуюн Т.А.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО Белгородский гос-й технологический ун-т им. В.Г. Шухова. – №2016136002; заяв. 06.09.16; опубл. 02.03.2017 Бюл. №7.

Подписано в печать 06.03.2019

Формат 60×90/16. Бумага офсетная. Гарнитура Times New Roman
Печать электрографическая. Усл. печ. л. 1. Уч.-изд. л. 1,1. Тираж 100 экз.
Заказ № 12604

Отпечатано с готового оригинал-макета в типографии «11-й ФОРМАТ»
115230, Москва, Варшавское шоссе 36

