

Белгородский государственный технологический университет
им. В.Г. Шухова

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
Доктор технических наук, доцент
Дуюн Татьяна Александровна

Белгород – 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИИ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ПОДШИПНИКОВ И ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ ОПОРНОЙ ПОВЕРХНОСТИ СКОЛЬЖЕНИЯ	9
1.1. Конструктивные особенности и условия эксплуатации крупногабаритных подшипников скольжения	9
1.2. Анализ эксплуатационных, физико-механических и технологических свойств баббитов.....	18
1.3. Анализ традиционной технологии обработки баббитовых вкладышей крупногабаритных подшипников.....	22
1.4. Выводы	29
ГЛАВА 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ФРЕЗЕРОВАНИЯ БАББИТА	30
2.1. Обоснование метода механической обработки, обеспечивающего заданные эксплуатационные параметры качества при обработке баббита.....	30
2.2. Разработка эмпирической модели силы резания при фрезеровании баббита..	35
2.3. Разработка эмпирических моделей температуры резания при фрезеровании баббитов на оловянной и свинцовой основе	49
2.4. Разработка эмпирических моделей шероховатости поверхности при фрезеровании баббитов на оловянной и свинцовой основе	63
2.5. Результаты и выводы	74
ГЛАВА 3. ПРОЕКТИРОВАНИЕ СТАНОЧНОГО МОДУЛЯ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ОПОРНОЙ ПОВЕРХНОСТИ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ПОДШИПНИКОВ	75
3.1. Разработка структурной и кинематической схемы исполнительного механизма	76
3.2. Исследование кинематических параметров исполнительного механизма для обеспечения заданного качества обрабатываемой поверхности	91
3.3. Разработка конструктивного исполнения станочного модуля	98
3.4. Моделирование кинематики и динамики станочного модуля.....	105

3.5. Результаты и выводы	112
ГЛАВА 4. ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ОБРАБОТКИ ОПОРНОЙ ПОВЕРХНОСТИ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ПОДШИПНИКОВ	113
4.1. Разработка оптимизационного алгоритма	113
4.2. Разработка оптимизационной модели.....	116
4.3. Результаты реализации оптимизационного алгоритма и оптимизационной модели.....	123
4.4. Расчет показателей экономической эффективности	132
4.5. Результаты и выводы	134
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	135
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	137
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	150

ВВЕДЕНИЕ

Крупногабаритные подшипники скольжения широко используются в кораблестроительной, строительной и горнорудной промышленности, как одни из основных элементов таких агрегатов, как мельницы полусамозмельчения, мельницы самоизмельчения, бутары и другое крупногабаритное вращающееся оборудование. Увеличение срока бесперебойной работы сушильного и помольного оборудования во многом зависит от состояния особо важных и нагруженных узлов, качественного и своевременного ремонтного обслуживания.

Качество опорной поверхности крупногабаритных подшипников скольжения оказывает существенное влияние на надежность и ресурс работы эксплуатируемого агрегата. Погрешности формы данной поверхности могут вызвать дополнительные вибрации, неравномерный износ подшипника, нарушение работы агрегата в целом. Шероховатость поверхности скольжения формирует условия трения, оказывая существенное влияние на процессы износа.

Традиционная технология ремонтной обработки крупногабаритных подшипников скольжения, выполняемая, как правило, по месту эксплуатации агрегата, имеет ряд существенных недостатков, основным из которых является применение шабрения как окончательного и основного вида обработки, имеющего низкую производительность, высокую себестоимость, нестабильное качество, зависящее от квалификации исполнителя.

Основные направления экономического и социального развития строительной и горнорудной отрасли предполагают в первую очередь изготовление машин и механизмов, позволяющих повысить технический уровень производства, резко сократить применение ручного труда [67]. Значительное внимание при проектировании машин и технологических линий уделяется вопросам улучшения условий труда обслуживающего персонала, а именно: механизации и автоматизации трудоёмких процессов, обеспечению действующих в России санитарных норм по допустимому уровню шума, вибрации и запылённости [63].

Крупногабаритное оборудование эксплуатируется в течение нескольких лет (в некоторых случаях - десятков лет) непрерывно. За это время узлы и детали агрегатов из-за возникающих вибраций, нагрузок, внешних факторов изменяют свою геометрическую форму, теряют первоначальные свойства. Это приводит к повышенному расходу энергоносителей, увеличенному шуму агрегата, понижению производительности и понижению надёжности агрегата.

Срок эксплуатации крупногабаритных подшипников скольжения составляет 4-6 лет при проведении соответствующих технических работ по его обслуживанию в соответствии с установленным регламентом [19, 21]. При выполнении этих работ перезаливку баббитового вкладыша опоры скольжения достаточно производить 1 раз в 5 лет. Однако, в реальных условиях на предприятиях часто наблюдается ежегодный ремонт подшипников с перезаливкой вкладыша, как результат тяжелых условий работы подшипников и несоблюдения технического регламента.

В связи с этим разработка и применение более производительного метода механической обработки с использованием специального переносного оборудования будет иметь существенный технико-экономический эффект: повысит производительность и качество обработки, снизит себестоимость.

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.

Задачи исследования:

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

2. Выявление взаимосвязей протекания силовых и тепловых явлений, сопровождающих фрезерование баббита, с технологическими параметрами

процесса, установление закономерностей формирования качества обрабатываемой поверхности.

3. Определение технологических параметров специального станочного модуля, обеспечивающих заданное качество обрабатываемой поверхности.

4. Определение структурных и кинематических параметров специального станочного модуля, обеспечивающих высокую производительность процесса при заданном качестве обрабатываемой поверхности.

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 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 назначения технологических режимов, обеспечивающих достижение технико-экономических параметров процесса фрезерования с использованием специального станочного модуля.

Методы исследования. Теоретические исследования, приведенные в диссертации, 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.

Реализация и внедрение результатов работы. Внедрение результатов работы осуществлено в ЗАО «Оскольский завод металлургического машиностроения» в рамках программы внедрения специальных технических средств для совершенствования ремонтных работ, действующей на предприятии, что позволило повысить стабильность параметров качества обработки баббита на 10-15% и сократить брак, что подтверждается актом внедрения.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались на следующих 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.

Публикации: по результатам работы опубликовано 17 печатных работ, в том числе 7 в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ, получено два патента РФ на полезную модель.

Структура и объём работы: диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, приложений. Работа включает 156 страниц, в том числе 136 страниц основного текста, 25 таблиц, 64 рисунка, 140 формул, список литературы из 118 наименований и 3 приложения.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИИ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ПОДШИПНИКОВ И ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ ОПОРНОЙ ПОВЕРХНОСТИ СКОЛЬЖЕНИЯ

1.1. Конструктивные особенности и условия эксплуатации крупногабаритных подшипников скольжения

Крупногабаритные подшипники скольжения широко используются в добывающей и перерабатывающей отраслях промышленности, являясь неотъемлемыми частями крупных мельниц самоизмельчения, мельниц полусамозмельчения, сушильных барабанов и прочего тяжелого стационарного крупногабаритного вращающегося оборудования.

Подшипники скольжения данных агрегатов имеют самые различные размеры и режимы работы. Диаметр вкладыша подшипника может лежать в интервале от 320 мм до 2700 мм [18,64, 103]. В табл. 1.1 представлены для примера типоразмеры шаровых мельниц и используемые в них подшипники.

Таблица 1.1

Типоразмеры мельниц и применяемые подшипники

Типоразмер мельницы	Размеры, мм	
	внутренний диаметр вкладыша, D	ширина вкладыша, B
1,6x5,5	700	300
2,0x5,0	800	370
2,0x10,5	800	370
2,6x13,0	1200	770
2,6x6,5	1200	770
3,2x8,5	1400	550
3,0x14,0	1400	860
3,0x12,0	1400	860
3,2x15,0	1400	860
4,0x13,5	1800	1000
4,2x10,0	2100	800
4,6x10,0	2400	850
5,2x12,0	2700	695

Для крупных шаровых мельниц рекомендуемое число оборотов барабана составляет $0,1-0,3 \text{ об/с}^{-1}$, а для небольших мельниц оно может достигать до $0,5-0,9 \text{ об/с}^{-1}$ [28, 84].

Материал вкладыша в значительной степени определяет работоспособность подшипника в целом. Он выбирается из условия создания антифрикционной пары с цапфой, при этом надежность подшипника зависит от твердости цапфы [44, 80].

Баббиты – легкоплавкие сплавы на основе свинца или олова, используются в виде слоя, залитого (наплавленного) или напыленного в жесткий корпус подшипника [16].

Крупногабаритные подшипники скольжения имеют, как правило, сборную конструкцию [25, 87], состоящую из 3-х одинаковых сегментов с углом раскрытия 120° каждый (рис. 1.1), 2-х сегментов с углом раскрытия 180° или одним сегментом с углом раскрытия 180° и крышкой.



Рис. 1.1. Сегмент подшипника

Достоинством данной конструкции является возможность обработки каждого сегмента по отдельности, изготовление корпуса из недорогого чугуна СЧ 21-40 ГОСТ 1412-54, возможность изготовления под цапфы любого диаметра и грузоподъемности [36].

Крупногабаритные подшипники скольжения работают, как правило, в тяжелых условиях, поэтому в процессе эксплуатации выполняют систематический надзор их работоспособности:

- в конце каждой рабочей смены производится визуальный осмотр агрегата в целом и каждого подшипника в отдельности;
- особенное внимание уделяется подшипниковым узлам в работе которых обнаружены и исправлены неисправности во время предыдущей смены;
- контролируется степень нагрева подшипника во время работы;
- контролируется надежность крепления корпуса и крышки;
- контролируется достаточность поступления смазочного материала.

Подшипники оборудованы приборами для контроля температуры. Температура опорного (нагруженного) вкладыша подшипника не должна превышать $60...65^{\circ}$, а температура наружной поверхности корпуса — соответственно $50...55^{\circ}$. Не допускается работа механизма при превышении указанного температурного предела.

Одной из причин повышенного нагрева подшипников скольжения может являться снижение качества опорной поверхности скольжения и возникновение погрешности ее формы в процессе эксплуатации подшипника.

Ремонту обычно подвергают только нижний сегмент, т.к. он принимает основную часть нагрузки при эксплуатации подшипника, следовательно, его опорная поверхность скольжения подвергается максимальному износу [27, 41, 47, 50].

Сегмент опорного подшипника является сложной корпусной деталью, состоящей из корпуса и вкладыша скольжения (рис. 1.2).

В качестве материала для корпуса сегмента используют, как правило, серый чугун СЧ 21-40 ГОСТ1412-54. Вкладыш скольжения получают заливкой на верхнюю часть корпуса баббита Б16 или Б83 (ГОСТ 1320-74). Для закрепления баббита на контактной поверхности корпус имеет пазы типа «ласточкин хвост», перпендикулярные оси радиусной поверхности [38]. Для подшипников ответственного назначения главным образом используют Баббит Б83. Работа

подшипниковых узлов обеспечивается в основном за счёт повышенной теплопроводности граничного слоя, которая обеспечивает сохранность смазочного материала при повышенных скоростях и нагрузках. Износостойкость свинцовых баббитов значительно ниже, чем у оловянных. Однако подшипники с баббитовыми вкладышами чувствительны к температуре в зоне скольжения, при достижении температуры 70°C износостойкость таких подшипников значительно снижается.

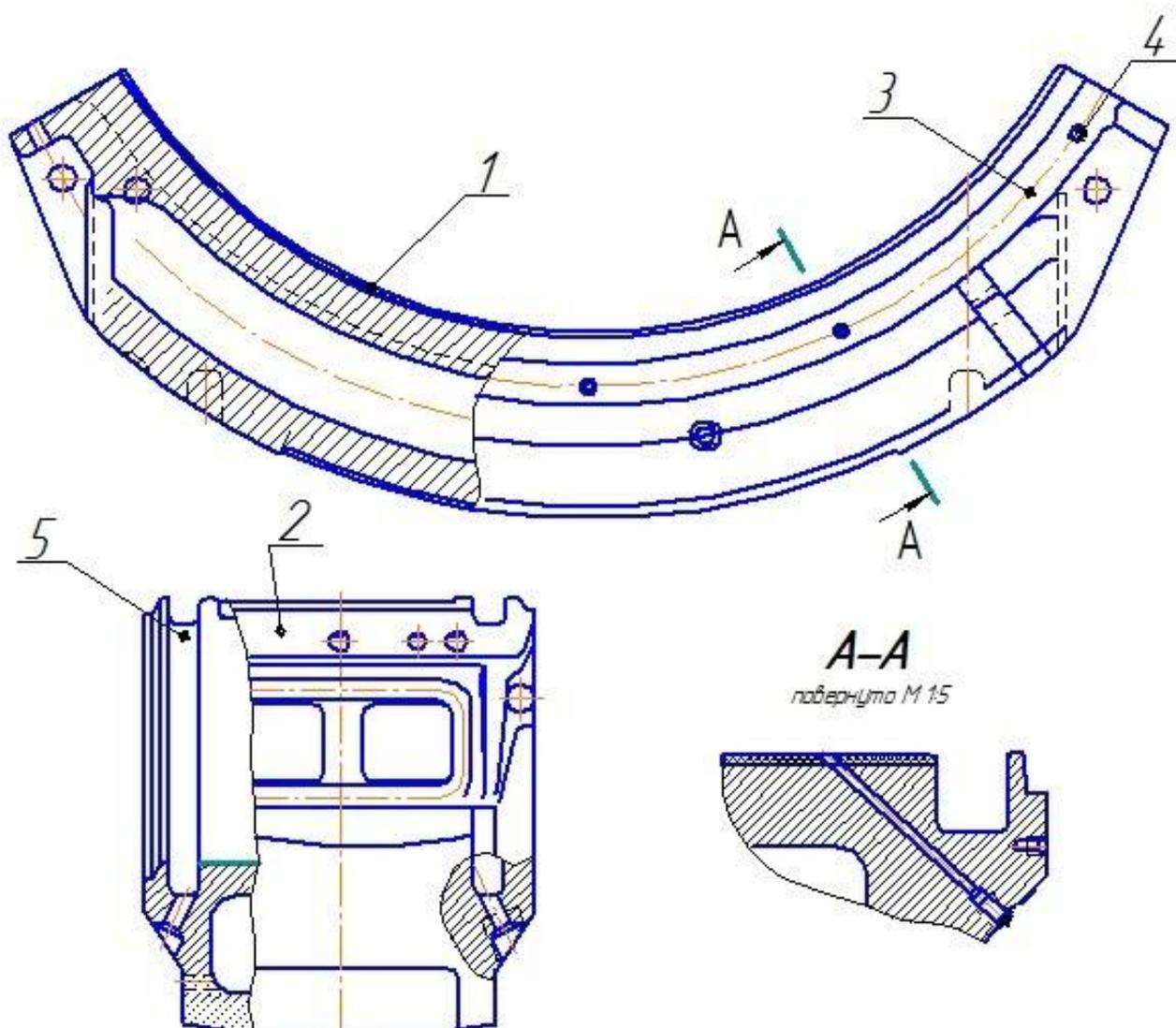


Рис. 1.2. Общий вид корпуса опорного подшипника: 1 – рабочая часть подшипника – поверхность баббита, 2- торец подшипника, 3 – кольцевая проточка, 4 – отверстия для крепления станка с резьбой М16, 5 – канавка для слива масла

Основными функциональными поверхностями корпуса являются: плоскости сопряжения, предназначенные для сборки сегментов (на плоскостях имеются крепежные отверстия) и рабочая поверхность под заливку вкладыша скольжения, имеющая до тридцати пазов типа ласточкин хвост для фиксации баббитового вкладыша.

Опорная поверхность подшипников скольжения является поверхностью, от качества исполнения которой зависит работоспособность всего агрегата, поэтому к ней предъявляют весьма жесткие требования.

В процессе работы агрегата поверхность скольжения обеспечивает удержание смазки, условия трения-скольжения, износостойкость и, в итоге, сохранение прямолинейности оси печи максимально долгое время за счёт минимального изменения величины зазора [86].

Рекомендуемые точность и качество [29, 30, 46] обработки опорной поверхности скольжения прописаны в технической документации к каждому подшипнику и находятся в диапазоне 8-12 качества с шероховатостью Ra3,2, допуск на диаметр составляет +1,35 мм; отклонение от цилиндричности принимается равным допуску на диаметр и составляет 1,35 мм. Параметры качества поверхности, обеспечиваемые различными видами обработки, применяемыми к данным подшипникам представлены в табл. 1.2 [56].

Таблица 1.2

Точность и качество обработки подшипников

Вид обработки	Шероховатость	Отклонение от цилиндричности	Квалитет	Допуск на диаметр
Шабрение	1,6-6,3	-	11	-
Точение получистовое	3,2-6,3	1,35	11	+1,35
Фрезерование получистовое	3,2-6,3	1,35	11	+1,35

Процесс эксплуатации подшипника скольжения сопровождается непрерывным во времени процессом изнашивания трущихся поверхностей [39,

53], который представляет собой условную кривую износа (рис. 1.3), имеющую три четко выраженные зоны [59, 70].

Зона I характеризует начальную работу сопряжения т.е. период приработки сопряженных деталей $t_{пр}$. При $t=0$ существует начальный зазор $S_{нач}$ в соответствии с видом посадки и точностью сборки (монтажа). Изнашивание в этот период происходит интенсивно, так как новые детали имеют поверхности со значительными макро- и микронеровностями и как следствие небольшую площадь соприкосновения [69]. В процессе работы происходит сглаживание неровностей, площадь соприкосновения увеличивается и скорость изнашивания уменьшается [88, 89]. В точке А заканчивается процесс приработки. В зоне II (период $t_э$) изнашивание происходит сравнительно медленно и равномерно, износ называют естественным. Износ, соответствующий точке Б, называют допустимым, ресурс детали не исчерпан и деталь ещё сохраняет работоспособность. Зона III характеризует период форсированного изнашивания. Эксплуатация в этот период становится опасной и может привести к аварии. Точка В на кривой выражает предельный износ при котором детали подлежат восстановлению.

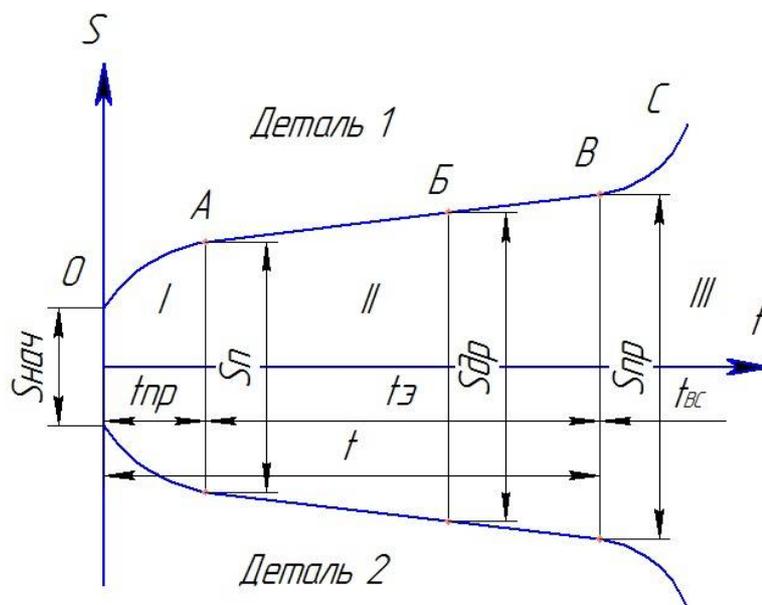


Рис. 1.3. Кривая износа сопряжения пары вал-подшипник

Если обозначить интенсивность изнашивания вала и подшипника в период приработки и эксплуатации i_{Π} и $i_{\mathcal{E}}$ соответственно, а S_{\min} и S_{\max} – начальные минимальные и максимальные зазоры в сопряжении, то

$$t_{np} = \frac{I_{B.\Pi.} - I_{\Pi.\Pi.}}{i_{\Pi}} \quad 1.1$$

где t_{np} – период приработки сопряженных деталей; $I_{B.\Pi.}$ и $I_{\Pi.\Pi.}$ – износ за период приработки вала и подшипника соответственно;

$$t_{\mathcal{E}} = \frac{I_{B.\mathcal{E}} + I_{\Pi.\mathcal{E}}}{i_{\mathcal{E}}} \quad 1.2$$

где $t_{\mathcal{E}}$ – естественный износ; $I_{B.\mathcal{E}}$ и $I_{\Pi.\mathcal{E}}$ – износ за период эксплуатации вала и подшипника соответственно;

$$I_{\mathcal{E}} = S_{np} - S_{нач} \quad 1.3$$

$$S_{нач} = (S_{\max} + S_{\min})/2 \quad 1.4$$

где $I_{\mathcal{E}}$ – предельный износ сопряжения в результате работы трущейся пары; S_{np} – предельный износ трущейся пары.

При достижении предельного износа исчерпывается ресурс сопряжения вал-подшипник [33]. В настоящее время практически отсутствуют приемлемые безразборные методы измерения величины износа деталей и скорости их изнашивания, поэтому считают, что величина износа I пропорциональна наработке H детали [57]:

$$I = rH^a \quad 1.5$$

где a – степенной показатель, определяющий характер изменения скорости изнашивания; r – коэффициент пропорциональности.

Особое внимание уделяют износу самого нижнего сектора подшипника с углом раскрытия 30° . Данная часть подшипника мельницы воспринимает основную нагрузку в процессе работы и от её технического состояния зависит работоспособность мельницы в целом [79].

Рассчитаем начальный зазор $S_{нач}$ в сопряжении, соответствующий первоначальному зазору после приработки трущихся пар [мм]:

$$S_{нач} = 0,467r \sqrt{\frac{\eta n l}{q(r+l)}} \quad 1.6$$

$$S_{нач} = 0,467 \cdot 1410 \sqrt{\frac{35 \cdot 10 \cdot 695}{3734000(1410+695)}} = 3,64$$

где r – радиус подшипника; n – количество оборотов мельницы в минуту; q – нагрузка на подшипник; l – ширина вкладыша.

В процессе работы подшипника скольжения наблюдается увеличение зазора между цапфой и верхней частью вкладыша подшипника, что искривляет ось мельницы, приводит к вибрациям в процессе работы, повышает расход электроэнергии [22].

На основании производственного опыта перезаливка вкладыша подшипника производится при износе вкладыша (рис 1.4) более чем на треть толщины.

$$S_{\text{практ}} = \frac{b}{3} \quad 1.7$$

$$S_{\text{практ}} = \frac{22}{3} = 7,33$$

где b – толщина баббитового слоя в подшипнике скольжения.

Из практических наблюдений известно, что ремонт крупногабаритных подшипников скольжения, при соблюдении регламентных технических работ, проводится один раз в 4-6 лет [58, 60]. Рассчитаем зазор в подшипниках скольжения, образующийся при их работе в течение пяти лет [мм]:

$$S_{\text{max}} = C_R \cdot S_{\text{opt}} \quad 1.8$$

$$S_{\text{max}} = 2 \cdot 3,67 = 7,34$$

где C_R – коэффициент износа крупногабаритного подшипника скольжения подобного типоразмера за 4-6 лет, S_{opt} – оптимальный зазор в сопряжении.

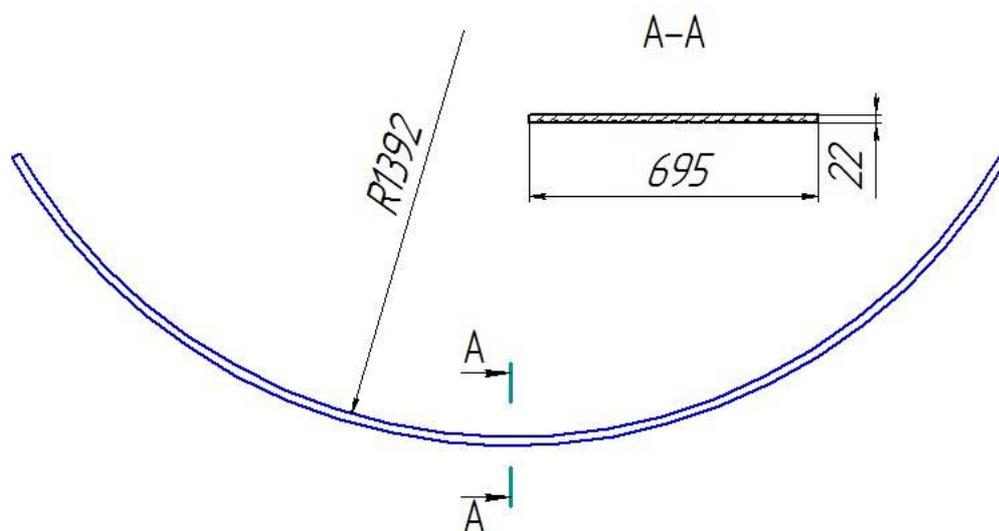


Рис. 1.4. Размеры залитого в подшипник баббита

Определим величину износа подшипника, применив формулу 1.5. Известно, что степенной показатель $a=0,49$, так как величина износа зависит от количества запусков и остановок агрегата, а коэффициент пропорциональности $r=0,05$, так как основной износ происходит в период пуска мельницы и учитывается коэффициентом a .

$$I = 0,05 \cdot 30240^{0,49}$$

Согласно формуле 1.5 износ мельницы за пять лет работы составит 7,84 мм, что примерно равно рассчитанному выше износу за 5 лет и подтверждает практические наблюдения.

Срок эксплуатации крупногабаритных подшипников скольжения составляет 4-6 лет при проведении соответствующих технических работ по его обслуживанию в соответствии с установленным регламентом: замена уплотнителей, обеспечение непрерывной подачи масла и проточной воды для смазки и охлаждения трущихся элементов [19, 21]. При выполнении этих работ перезаливку баббитового вкладыша опоры скольжения достаточно производить 1 раз в 5 лет. Однако, в реальных условиях на предприятиях часто наблюдается ежегодный ремонт подшипников с перезаливкой вкладыша, как результат тяжелых условий работы подшипников и несоблюдения технического регламента.

1.2. Анализ эксплуатационных, физико-механических и технологических свойств баббитов

Надежность работы подшипников скольжения в значительной степени определяется материалом опор скольжения, который во взаимодействии с материалом цапфы должен образовывать антифрикционное соединение [81, 104]:

- низкий коэффициент трения для снижения потери мощности на трение;
- хорошая прирабатываемость;
- высокая износостойкость;
- хорошая смачиваемость смазочным материалом и быстрое восстановление на поверхности масляной пленки;
- малая склонностью к заеданию;
- высокая теплопроводность, обеспечивающая распределение тепла по всему подшипнику от поверхности трения;
- малый коэффициент линейного расширения, обеспечивающий малый интервал изменения зазора в подшипниках;
- достаточная усталостная прочность (при пульсирующей нагрузке);
- коррозионная стойкость.

Изготовление баббитов регламентируется межгосударственным стандартом ГОСТ 1320-74 (ИСО 4383-91) Баббиты оловянные и свинцовые. Технические условия (с изменениями N 1-7).

Химический состав различных марок баббитов по ГОСТ 1320-74 приведен в таблице 1.3.

В основе баббитов лежат олово (Б83, Б89) и свинец (Б16, БН, БС16). Подшипники на основе олова применяют для ответственных агрегатов в связи с высокой теплопроводностью граничный слой смазочного материала остается при больших скоростях и нагрузках, что значительно влияет на их надежность [100]. Износостойкость свинцовых баббитов значительно ниже, чем у оловянных. Износостойкость баббитов в значительной степени зависит от температуры в зоне

трения. При увеличении температуры до 70°C происходит значительное снижение износостойкости подшипников [110].

Таблица 1.3

Химический состав различных марок баббитов по ГОСТ 1320-74

Марка	Хим. состав %, основные компоненты				
	Sn, олово	Sb, сурьма	Cu, медь	Cd, кадмий	Ni, никель
Б88	Остальн.	7,3-7,8	2,5-3,5	0,8-1,2	0,15-0,25
Б83	Остальн.	10,0-12,0	5,5-6,5	-	-
Б83С	Остальн.	9-11	5,0-6,0	-	-
Б16	15,0-17,0	15-17	1,5-2,0	-	-
БН	9,0-11,0	13-15	1,5-2,0	0,1-0,7	0,1-0,5
БС6	5,5-6,5	5,5-6,5	0,1-0,3	-	-

Марка	Хим. состав %, основные компоненты					
	Fe, железо	As, мышьяк	Zn, цинк	Bi, Висмут	Al, алюминий	Pb, свинец
Б88	0,05	0,05	0,005	0,05	0,005	-
Б83	0,1	0,05	0,004	0,05	0,005	-
Б83С	0,1	0,1	0,01	0,05	0,005	1,0-1,5
Б16	0,08	0,2	0,07	0,1	0,01	Остал.
БН	0,1	-	0,02	0,1	0,05	Остал.
БС6	0,1	0,05	0,01	0,07	0,005	Остал.

Свинцовые баббиты уступают оловянным баббитам по механическим и антифрикционным свойствам, но значительно выигрывают в цене, также их стойкость к коррозии значительно ниже, чем у оловянных, это объясняет их применение в менее ответственных случаях. Различия плотности олова, свинца и сурьмы обеспечивают такой негативный фактор, как неравномерность химического состава по объему слитка, в некоторой степени это исправляется добавлением меди в сплав [118].

Антифрикционные свойства баббитов, обеспечиваемые их неоднородной структурой превосходят большинство известных сплавов, применяемых в данных

целях и условиях. Оловянные баббиты в своей основе имеют мягкий раствор сурьмы в олове с равномерно распределенными твердыми частицами SnSb. Добавление легирующего элемента медь в оловянные баббиты повышает их твердость в следствие образования твердых включений Cu_3Sn , а добавление небольшого количества кадмия и никеля снижает размеры зерен [110].

При использовании подшипников скольжения цапфа опирается на твердые частицы в составе баббита, которые обеспечивают высокую износостойкость и способность противостоять высоким нагрузкам [44], мягкая основа в составе баббита обеспечивает быструю прирабатываемость, создание микрорельефа для подачи и удержания смазки между трущимися поверхностями. Гетерогенная структура баббитов уменьшает коэффициент трения за счет удержания пленки смазки.

Подшипники с баббитовым вкладышем должны иметь прочный корпус из стали, чугуна или бронзы в следствие низкой прочности баббитов и их низкому сопротивлению усталости.

Физико-механические свойства различных марок баббитов по ГОСТ 1320-74 приведен в таблице 1.4.

Таблица 1.4

Физико-механические свойства различных марок баббитов
по ГОСТ 1320-74

Марка баббита	Плотность, г/см	Твердость по Бриннелю, НВ при 20 °С	Предел текучести при сжатии, кгс/мм	Предел прочности при сжатии, кгс/мм	Температура начала расплавления, °С	Температура плавлени, °С	Температура заливки, °С
Б88	7,35	27-30	-	-	-	320	380-420
Б83	7,38	27-30	8-8,5	11-12	240	370	440-460
Б83С	7,4	27-30	-	-	230	400	440-460
БН	9,55	27-29	7-7,4	12,5-13	240	400	480-500
Б16	9,29	30	8,6	14,7	240	410	480-500
БС6	10,05	15-17	-	-	247	280	480-500

Условия применения различных марок баббитов по ГОСТ 1320-74 приведены в таблице 1.5.

Таблица 1.5

Условия применения различных марок баббитов по ГОСТ 1320-74

Марка баббита	Характеристика нагрузки	Удельное давление P , кгс/см	Окружная скорость, V , м/с	Напряженность работы, $\frac{\text{кгс/м}}{\text{см}\cdot\text{с}}$	Рабочая температура, °С	Примерное назначение
Б88	Спокойная ударная	200, 150	50	750	75	Подшипники, работающие при больших скоростях и высоких динамических нагрузках.
Б83	Спокойная ударная	150, 100	50	750, 500	70	Подшипники, работающие при больших скоростях и средних нагрузках.
Б83С	Спокойная ударная	150, 100	50	750, 500	70	Подшипники, работающие при средних скоростях и средних нагрузках.
БН	Спокойная ударная	100, 76	30	300, 200	70	Подшипники, работающие при средних скоростях и средних нагрузках.
Б16	Спокойная	100	30	300	70	Подшипники оборудования тяжелого машиностроения
БС6	Ударная	150	-	-	70	Подшипники автотракторных двигателей

Конструкция и толщина вкладыша в крупногабаритных подшипниках скольжения позволяют применять как свинцовые (Б16) так и более дорогие оловянные (Б83, Б88) баббиты. Свинцовый баббит Б16 в основном используется в горнорудной и строительной промышленности в мельницах, бударах и других крупногабаритных вращающихся агрегатах [32, 76].

Особенностью физико-механических свойств баббитов, определяющей возможности применения методов механической обработки, является достаточно низкая температура начала расплавления – 240 C^0 . Поэтому при выборе методов механической обработки баббитов необходимо учитывать данную особенность, а назначаемые режимы резания должны обеспечивать допустимую температуру резания. В табл. 1.6 представлены механические свойства баббитов при повышенных температурах. С увеличением температуры твердость баббита, предел его прочности при сжатии и растяжении существенно снижаются, так уже при температуре 100C указанные параметры снижаются примерно в 2 раза.

Таблица 1.6

Механические свойства баббитов при повышенных температурах

Температура испытаний, °C	Твердость по Бриннелю, МПа			Предел прочности при сжатии, МПа		Предел прочности при растяжении, МПа		
	Б88	Б83	Б16	Б88	Б83	Б88	Б83	Б16
20	240	299	295	114	108	80	90	78
50	182	288	—	83	92	65	—	—
75	148	185	197	66	—	55	—	—
100	113	145	150	48	55	46	54	55
150	108	82	81	—	55	28	32	—
175	—	59	69	—	42	20	—	—
200	23	26	—	—	—	18	—	—

1.3. Анализ традиционной технологии обработки баббитовых вкладышей крупногабаритных подшипников

Существует два основных вида ремонтной обработки вкладышей крупногабаритных подшипников скольжения, имеющих принципиальные отличия [11, 26, 63]:

- в условиях горно-обогатительных комбинатов или по месту работы агрегата;

- на ремонтном заводе или заводе-изготовителе.

Каждый из способов обладает своими преимуществами и недостатками. Рассмотрим технологический маршрут ремонтной обработки каждого из способов.

Технологический маршрут ремонта на горном предприятии состоит из шести основных операций:

1. Удаление баббитового слоя.
2. Подготовка вкладыша к перезаливке.
3. Заливка вкладыша баббитом.
4. Шабрение баббитового слоя (черновое и чистовое).
5. Окончательная обработка.
6. Контроль качества полученной поверхности.

Рассмотрим подробнее операцию механической обработки опорной поверхности баббитового вкладыша. После перезаливки извлекают все установленные пробки, а также заполнявший масляные карманы асбест, удаляют технологический припуск баббита в горизонтальном разъеме и выполняют шабрение горизонтального разъема в соответствии с требованиями, предъявляемыми к разъему вкладыша [45, 90, 107].

После контроля качества заливки баббита производится обработка масляных карманов и других выборок в соответствии с чертежом или заранее выполненным эскизом вкладыша.

Для выполнения шабрения изготавливается специальный шаблон необходимого радиуса и по нему производится ручная обработка внутренней поверхности баббита. Перед операцией шабрения и параллельно с процессом её выполнения визуально контролируется залитый баббит на наличие трещин, раковин и других дефектов поверхности. Если дефекты обнаруживаются, то производят их исправление путем наплавки или полной перезаливки вкладыша.

Наплавку дефектных мест производят до окончательной обработки вкладыша [67, 68].

Применение шабрения, как финишной обработки объясняется особыми свойствами обработанной поверхности, в частности: повышенной износостойкостью поверхности, обусловленной отсутствием в её порах остатков абразивных зерен, повышенную смазываемость поверхности, обеспечиваемую разбивкой на пятна, а также применение самого доступного метода оценки качества обработанной поверхности – по количеству пятен на единице площади поверхности [2].

Подготовительные работы предшествующие шабрению заключаются в промывке, протирке и нанесении краски на обрабатываемую поверхность. Краска состоит из машинного масла с лазурью или сажой (ультрамарином). Шабровочную краску наносят на поверочную плиту тампоном ровным тонким слоем. Процесс шабрения заключается в постепенном удалении сплава с окрашенных участков.

Как и любая механическая операция шабрение состоит из нескольких переходов: черновое (предварительное), получистовое (точечное). При черновом шабрении длина хода инструмента равна 15 – 20 мм, при чистовом она сокращается до 2 – 5 мм. Штрихи в процессе шабрения должны пересекаться между собой под углом $45 - 60^{\circ}$ для лучшего распределения смазки по поверхности трения. На заключительных этапах крупные пятна расшабриваются на несколько мелких, равных по площади. Чем точнее степень обработки поверхности, тем тоньше слой краски и более узкий шабер необходимо использовать.

Контрольная рамка с квадратным окошком 25x25 мм служит инструментом для определения качества обработанной поверхности. Её прикладывают на пришабренную поверхность и считают число пятен. Минимальное число пятен при черновом шабрении – 5, при получистовом – 12, при чистовом – 20, при точном – 30, при тонком свыше 35 [34].

Качество выполняемого шабрения необходимо контролировать с помощью поверочных инструментов в течение всего процесса, поскольку от качества выполненной работы зависит работоспособность агрегата в целом [109].

Ручное шабрение при ремонтной обработке крупногабаритных подшипников скольжения занимает значительную часть из планируемого времени ремонта. В каждом возможном случае ручное шабрение стремятся механизировать или заменить на обработку, обеспечивающую те же выходные параметры [49, 52, 77, 116].

Существуют механизированные инструменты для шабрения с электрическим и пневматический приводом. Пневматический инструмент в силу своих характеристик и особенностей особенно популярен в промышленных и производственных условиях [42, 108].

Неоспоримыми достоинствами шабрения являются удержание смазки в неровностях обработанной поверхности и возможность обработки подшипника без его демонтажа и перевозки к месту ремонта.

Недостатком шабрения является получаемая точность формы поверхности. Ручное шабрение выполняется на отдельных участках поверхности по шаблонам, что не может гарантировать получение необходимой цилиндричности поверхности. В связи с чем возникает необходимость замены шабрения на альтернативные методы обработки баббита. При обработке вкладышей крупногабаритных подшипников скольжения необходимо производить обработку до 7-8 степени точности, это значит, что число пятен на проверяемом квадрате 25x25 мм должно быть 5-12. Геометрическая точность формы поверхности скольжения вкладыша крупногабаритного подшипника скольжения зависит от допуска на диаметр:

$$\frac{2T_{\phi}}{T_d} \cdot 100\% \geq 40 \quad 1.9$$

где T_{ϕ} – допуск формы; T_d – допуск на диаметр.

Необеспечение необходимой цилиндричности поверхности скольжения влияет на такие факторы как [112]:

- повышенный износ вкладыша в период приработки подшипника;
- перекос осей подшипника и цапфы;
- повышенный расход электроэнергии в период приработки;
- обеспечение необходимого масляного зазора между поверхностями трения.

При осуществлении ручного шабрения качество обработанной поверхности напрямую зависит от квалификации исполнителя, поэтому для достижения требуемых параметров качества необходима высокая квалификация работника [82]. Неточности применяемого при обработке шаблона вносят дополнительную погрешность, а используемые методы контроля не позволяют их выявить. Следствием может стать длительный период приработки поверхностей скольжения и повышенный износ на этапе приработки. Кроме того, высокая трудоемкость процесса сказывается на стоимости ремонта.

После операции шабрения проводят окончательную обработку подшипника, которая включает в себя удаление асбестовых пробок, очистку каналов, прогонку резьбы, удаление брызг, окалин, стружки.

В некоторых случаях для повышения качества опорной поверхности вкладышей подшипников после шабрения применяют вибрационную обработку. Вибрационная обработка увеличивает прочность поверхностного слоя обрабатываемой поверхности за счет ее пластического деформирования и, как следствие, возникновения эффекта наклепа, который возникает при воздействии на материал сдавливающих сил, приводящих к изменению структуры материала. Вибрационное обкатывание производится специальными термически обработанными шариками и роликами, вдоль и поперек оси заготовки [4, 5], которым кроме движения подачи придаётся и поступательное движение. Вибрационное обкатывание также применяется для выглаживания микронеровностей за счет силы, приложенной вертикально по отношению к обрабатываемой поверхности.

Однако, в условиях горно-рудных предприятий вибрационное обкатывание использовать не возможно, так как специальное приспособление с виброголовкой и роликом ставится на суппорт токарно-карусельного или расточного станка [13].

Технологический маршрут ремонта в условиях специализированных ремонтных заводов или на заводе изготовителе имеет ряд существенных отличий, основным из которых является используемое оборудование. По конструктивным признакам крупногабаритные подшипники скольжения практически не различаются, а их обработка осуществляется по типовому технологическому процессу с использованием однотипного оборудования.

Типовой технологический маршрут обработки вкладышей крупногабаритных подшипников скольжения включает в себя следующие основные операции:

1. Раздельная обработка вкладышей. На данном этапе вкладыши проходят полную разметку.
2. Обработка вкладышей под баббитовую заливку. После зачистки плоскостей разъема вкладыши собираются на болты, затем на карусельном станке вкладыши обрабатываются под баббитовую заливку.
3. Заливка вкладышей баббитом.
4. Раздельная обработка вкладышей после баббитовой заливки. На фрезерном станке обрабатывается плоскость разъема.
5. Чистовая обработка вкладышей после баббитовой заливки. Вкладыши с одинаковой маркировкой собираются на болты, на токарно-карусельном станке растачиваются начисто. По окончании карусельной операции вкладыши разбираются.
6. Окончательная обработка – удаление заусенцев, нарезание резьбы, удаление брызг и прочее.
7. Приемка техническим контролем.

Технический контроль включает в себя: проверку шероховатости в нескольких местах поверхности скольжения; проверку обработки плоскости

разъёма; проверку открытости масляных каналов; проверку слоя баббита на отслоения, трещины и прочие дефекты.

Технология ремонта с использованием токарно-карусельного или расточного станка обладает рядом неоспоримых преимуществ [51, 105], таких как точность обработки и качество обработанной поверхности, но не предполагает возможности ремонта подшипников в условиях неспециализированных цехов. Для данного ремонта требуются большие ремонтные мощности предприятия и наличие крупногабаритного оборудования, что не всегда возможно и рентабельно в условиях горных комбинатов.

Зачастую мельницы, в которых используются крупногабаритные подшипники скольжения, располагаются в местах, максимально приближенных к месту добычи руды – в горных районах, карьерах и т.п. Предприятия, способные выполнить ремонт подобных подшипников, располагаются, как правило, на значительном расстоянии от горнорудных комбинатов, что затрудняет и повышает стоимость ремонта за счет транспортных расходов, а также увеличивает время простоя мельницы. Содержание больших токарно-карусельных или расточных станков в условиях горнорудных комбинатов также не рентабельно вследствие их значительной стоимости и малой загрузки из-за больших межремонтных периодов крупногабаритных подшипников скольжения [55].

В связи с вышесказанным наибольшее распространение получил именно первый метод ремонтной обработки по месту работы агрегата с использованием шабрения. Данный метод имеет высокую трудоемкость, а получаемое качество напрямую зависит от квалификации исполнителя. Снижение трудоемкости данного процесса и повышение его качества может дать существенный технико-экономический эффект. Данный эффект может быть достигнут за счет разработки и применения специализированного ремонтного оборудования, обеспечивающего производительную и точную механическую обработку в условиях горнорудных или иных предприятий без использования транспортирования на ремонтное предприятие или завод-изготовитель.

1.4. Выводы

1. Качество опорной поверхности крупногабаритных подшипников скольжения оказывает существенное влияние на надежность и ресурс работы эксплуатируемого агрегата. Погрешности формы данной поверхности могут вызвать дополнительные вибрации, неравномерный износ подшипника, нарушение работы агрегата в целом. Шероховатость поверхности скольжения формирует условия трения, оказывая существенное влияние на процессы износа.

2. Традиционная технология ремонтной обработки имеет ряд существенных недостатков, основным из которых является применение в качестве окончательного метода обработки ручного шабрения, имеющего низкую производительность, высокую себестоимость, нестабильное качество, зависящее от квалификации исполнителя.

3. Разработка и применение более производительного способа механической обработки с использованием специального переносного оборудования будет иметь существенный технико-экономический эффект: повысит производительность и качество обработки, снизит себестоимость.

4. Для внедрения нового способа механической обработки опорной поверхности крупногабаритных подшипников необходима разработка общей компоновки, обоснование структурных и кинематических параметров специального станочного модуля, обеспечивающих высокую производительность процесса при заданном качестве обрабатываемой поверхности.

5. Для реализации нового способа обработки опорной поверхности крупногабаритных подшипников с использованием специального станочного модуля и обеспечения требуемого качества обрабатываемой поверхности необходимо выявление взаимосвязей протекания силовых и тепловых явлений, сопровождающих резание баббита, с технологическими параметрами процесса и конструктивными параметрами оборудования.

На основании проведенного анализа сформулированы цель и основные задачи исследования, представленные во введении.

ГЛАВА 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ФРЕЗЕРОВАНИЯ БАББИТА

Для решения выявленной задачи повышения эффективности ремонта опорной поверхности скольжения крупногабаритных подшипников необходимо заменить трудоёмкий и низкопроизводительный метод ручного шабрения на более производительный, позволяющий механизировать обработку. При этом предложенный метод должен обеспечивать заданные эксплуатационные параметры опорной поверхности скольжения, обуславливающие надёжную работу агрегата в целом.

Для технологического обеспечения заданных параметров качества обработанной поверхности необходимо установить влияние технологических режимов и условий обработки на обеспечиваемые параметры качества.

Важной задачей является определение технологических режимов, которые при обеспечении заданных параметров качества обрабатываемой поверхности могут быть реализованы в условиях ремонтной обработки с использованием специального приставного оборудования.

2.1. Обоснование метода механической обработки, обеспечивающего заданные эксплуатационные параметры качества при обработке баббита

Метод механической обработки оказывает существенное влияние на формирование параметров качества обрабатываемой поверхности.

Основными эксплуатационными параметрами опорной поверхности скольжения крупногабаритных подшипников являются параметры, обеспечивающие благоприятные условия трения-скольжения: коэффициент трения и износостойкость. Проанализируем параметры состояния поверхностного слоя, оказывающие влияние на коэффициент трения и износостойкость (табл. 2.1).

Основными параметрами, оказывающими наиболее существенное влияние на коэффициент трения и износостойкость являются: высота сглаживания макроотклонения, расстояние от средней линии профиля до огибающей, высота сглаживания волнистости, высота сглаживания профиля шероховатости,

относительная опорная длина на уровне средней линии, микропрофиля, поверхностная микротвердость. Износостойкость поверхности также существенно зависит от: среднего шага неровности профиля, остаточных напряжений на поверхности, физико-химических свойств.

Проведем сравнительный анализ обеспечения параметров состояния поверхностного слоя обработанной поверхности для различных методов обработки (табл. 2.2). В качестве базовых методов примем:

- растачивание, используемое в качестве окончательного метода при изготовлении подшипников, ремонте на специализированных предприятиях;
- шабрение, используемое в качестве окончательного метода ремонта в условиях эксплуатации агрегата;

В качестве предлагаемого альтернативного метода рассмотрим фрезерование. Применение фрезерования в качестве альтернативного метода обработки обеспечит необходимую шероховатость и остаточные сжимающие напряжения, что положительно влияет на износостойкость вкладыша подшипника (табл. 2.1 и 2.2). Снижение шероховатости в сочетании с повышенной твердостью обработанной поверхности позволит увеличить межремонтные циклы работы подшипника, а сниженный средний шаг неровности профиля обеспечит равномерное распределение смазочного материала (масла) между трущимися поверхностями подшипника [14, 15].

Исходя из представленных данных можно сделать вывод, что чистовое фрезерование обеспечивает необходимые параметры качества поверхностного слоя [3].

Таблица 2.1

Параметры, определяющие эксплуатационные свойства деталей и их соединений

Эксплуатационные свойства	Параметры состояния поверхностного слоя																	
	H _{max}	H _p	Wz	W _p	Sm _w	Ra, Rz	R _{max}	R _p	tp	Sm	S	σ _{ост}	h _{σ0}	H _{μ0}	h _μ	ε	l _з	ρ _D
Коэффициент трения	+	+*	+	+*	-	+	+	+*	-*	-	-	-	0	+*	0	+	-	-
Износостойкость	-	-*	-	-*	+	-	-	-*	+*	+*	+	+*	0	+*	0	+*	-*	-*

Примечание. Обозначение «+» и «-» означают соответственно, что повышение или снижение этих параметров вызывает улучшение или ухудшение данного эксплуатационного свойства: * - параметр оказывает основное влияние на данное эксплуатационное свойство; «0» - параметр не оказывает влияния на данное эксплуатационное свойство.

Таблица 2.2

Возможности методов обработки в обеспечении параметров качества поверхностного слоя деталей

Метод обработки	Параметры состояния поверхностного слоя										
	Ra, мкм	H _{max} , на 1000 мм, мкм	Sm, мм	S, мм	R _p , мкм	Wz, мкм	Sm _w , мм	±σ _{ост} , МПа	h _σ , мм	U _H , %	h _μ , мм
Торцовое фрезерование (чистовое)	1,0-4,0	50-140	0,08-0,2	0,063-0,2	3,2-16	1,6-10	0,8-4,0	200-250	0,1-0,2	10-40	0,08-0,15
Шабрение (черновое)	2,5-8,0	20-50	0,25-1,0	0,125-1,0	6,3-32	12,5-20	6,0-10,0	100-200	0,05-0,12	0-20	0,05-0,1
Растачивание (получистовое)	2,5-8,0	40-160	0,125-0,32	0,08-0,32	6,3-25	4,0-12,5	1,25-5,0	150-250	0,08-0,15	10-40	0,15-0,3

где H_{\max} – максимальное макроотклонение, мкм; H_r – высота сглаживания макроотклонения (расстояние от средней линии профиля до огибающей), мкм; W_z – средняя высота волны, мкм; W_p – высота сглаживания волнистости, мкм; Sm_w – средний шаг волн, мм; Ra – среднеарифметическое отклонение профиля, мкм; Rz – высота неровностей профиля по десяти точкам, мкм; R_{\max} – наибольшая высота профиля, мкм; R_p – высота сглаживания профиля шероховатости, мкм; tr – относительная опорная длина профиля, %; Sm – средний шаг неровностей профиля, мм; S – средний шаг местных выступов профиля, мм; $\sigma_{\text{ост}}$ – остаточные напряжения, МПа; $h_{\sigma 0}$ – глубина залегания остаточных напряжений, мм; $H_{\mu 0}$ – средняя поверхностная микротвердость; h_{μ} – глубина наклепа, мм; ε – степень пластической деформации по глубине поверхностного слоя; l_z – размер зерна, мм; ρ_D – плотность дислокации. где Ra , Rz , R_{\max} , R_p – высотные характеристики шероховатости; Sm , tm – шаг микронеровностей и относительная опорная длина на уровне средней линии микропрофиля; W_z , Sm_w – средняя высота волны и её шаг по средней линии волнистости; $H_{\mu 0}$, h_{μ} – поверхностная микротвердость и глубина наклепа; $\sigma_{\text{ост}}$, h_{σ} – остаточные напряжения на поверхности и глубина залегания остаточных напряжений; U_H – степень упрочнения.

В качестве обрабатывающего инструмента примем фрезу для фрезерования цилиндрического профиля компании Ceratizit (Австрия), которая будет устанавливаться на станок через специальную оправку. Данный тип фрез разрабатывался специально для фрезерования цилиндрических поверхностей мягких металлов и сплавов, таких как алюминий, медь, бронза, баббиты и др. Фрезы выпускаются диаметром 30 – 105 мм с количеством зубьев 3 – 10 шт. Зубья выполнены из сплава кобальта (6%) и карбида вольфрама (94%).

Выбор данной конструкции обусловлен особенностью конструкции режущих зубьев, выполненных в виде пластин круглого сечения. Круглая

форма зубьев позволит исключить погрешности обработки, возникающие при фрезеровании цилиндрической поверхности.

Угол α круглых зубьев зависит от диаметра зуба. У зубьев диаметром 5 – 8 мм $\alpha=15^\circ$, у зубьев диаметром 10 – 20 мм $\alpha=11^\circ$, также имеется возможность изготовления зубьев диаметром 10 – 20 мм с $\alpha=10^\circ$.

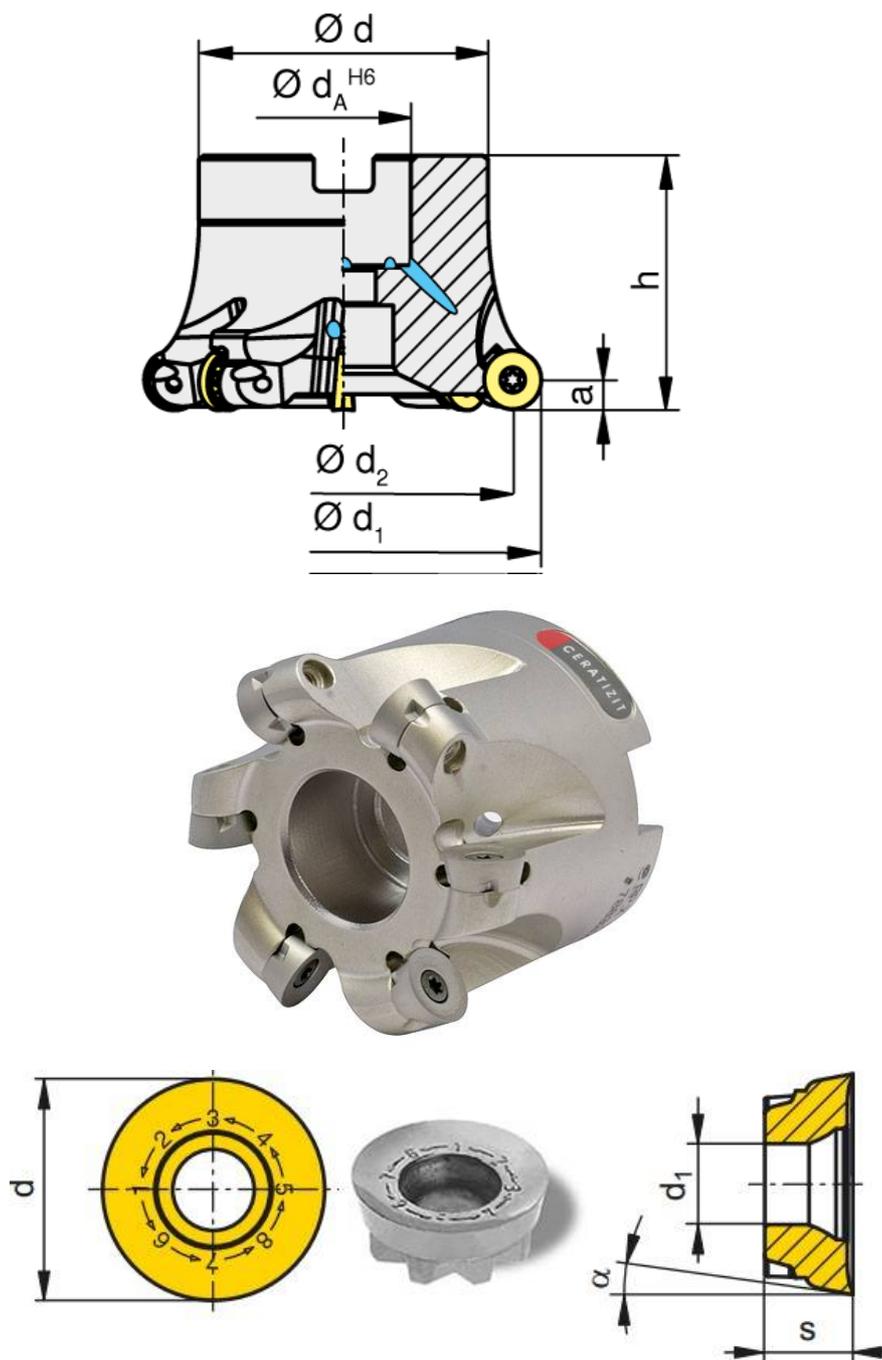


Рис. 2.1. Фреза для фрезерования цилиндрических поверхностей с пластинами и концевые круглые зубья

В табл. 2.3 представлены несколько типоразмеров выбранной конструкции фрезы. Для обоснования выбора оптимального типоразмера фрезы необходимо провести анализ силовых параметров, так как они зависят от диаметра и количества зубьев фрезы.

Таблица 2.3

Фрезы для фрезерования цилиндрических поверхностей со специальными круглыми зубьями.

d_1 , мм	d , мм	d_2 , мм	Количество зубьев	
40	10	50	3	4
50	10	60	3	4
60	12	72	4	5

2.2. Разработка эмпирической модели силы резания при фрезеровании баббита

Силовые характеристики процесса резания имеют большое значение при проектировании обрабатывающего оборудования, так как обуславливают требуемую мощность привода главного движения, прочностные характеристики конструкции, параметры жесткости технологической системы. Возникающая сила резания зависит от многих факторов, основными из которых являются: механические свойства обрабатываемого материала, его твердость, прочность и способность к упрочнению (наклепу), а также глубина резания, подача, использование СОЖ и геометрические параметры режущего инструмента [17, 78].

Поверхность скольжения крупногабаритного подшипника предполагается обрабатывать в несколько переходов: черновым (одним или двумя), получистовым и чистовым фрезерованием. При черновом и получистовом фрезеровании основной задачей является удаление большей части припуска, который составляет предположительно 5-10 мм, и подготовка поверхности под чистовое фрезерование. Таким образом, глубина резания при черновом фрезеровании равна 2,5-4 мм, глубина резания при

получистовом фрезеровании не будет превышать 2-2,5 мм. Возникающая сила резания должна соответствовать выбранной мощности привода главного движения. При чистовом фрезеровании сила резания оказывает влияние на параметры качества обрабатываемой поверхности.

Для исследования силы резания при фрезеровании баббитов различных марок, используемых для заливки вкладышей крупногабаритных подшипников скольжения проведем натурный эксперимент.

Целью исследования является выявление зависимости силы резания при фрезеровании баббита от технологических параметров.

В качестве исследуемых марок баббита примем наиболее часто используемые марки из групп оловянных и свинцовых баббитов: Б83 и Б16.



Рис. 2.2. Баббит свинцовый Б16



Рис. 2.3. Экспериментальная установка для измерения составляющих силы резания

В качестве режущего инструмента будем использовать аналог фрезы (табл. 2.3) диаметром 40 мм с тремя зубьями.

Для определения силы резания будем использовать прибор KISTLER TYPE5070A, представляющий собой многоканальный пьезоэлектрический динамометр (рис. 2.4).



Рис. 2.4. KISTLER TYPE5070A

Основные характеристики прибора представлены в таблице 2.4.

Таблица 2.4

Технические характеристики прибора KISTLER TYPE5070A

Диапазон	F_x, F_y	кН	-30...30
	F_z	кН	-10...60
Градированный диапазон	F_x, F_y	кН	0...30
	F_z	кН	0...60
Погрешность	Средняя	%	<0,3
	Максимальная	%	<1
Перекрестные помехи	$F_z \rightarrow F_x, F_y$	%	< ± 1
	$F_x \leftarrow \rightarrow F_y$	%	< ± 2
	$F_x, F_y \rightarrow F_z$	%	< ± 2
Начало измерения		Н	0,01
Чувствительность	F_x, F_y	пкК/Н	$\approx -7,9$
	F_z	пкК/Н	$\approx -3,9$

В качестве исследуемого параметра примем тангенциальную составляющую силы резания. В качестве влияющих факторов были выбраны

факторы, которые оказывают наиболее значительное влияние: глубина и ширина резания, подача режущего инструмента на зуб фрезы, диаметр и частота вращения режущего инструмента.

Решение данной задачи потребовало проведения математического планирования эксперимента [37].

Изменение величины тангенциальной составляющей силы резания в зависимости от технологических параметров представим уравнением регрессии степенного вида:

$$Pz = C \cdot t^{\alpha_1} \cdot s_z^{\alpha_2} \cdot B^{\alpha_3} \cdot n^{\alpha_4} \cdot D^{\alpha_5} \quad 2.1$$

где C – коэффициент; $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5$ – показатели степени при каждом факторе (степени влияния каждого фактора).

После логарифмирования уравнение 2.1 линейруется:

$$\lg(Pz) = \lg C + \alpha_1 \lg t + \alpha_2 \lg s_z + \alpha_3 \lg B + \alpha_4 \lg n + \alpha_5 \lg D \quad 2.2$$

Возможность аппроксимации зависимости тангенциальной составляющей силы резания уравнением вида 2.1 устанавливается проверкой гипотезы адекватности линейной модели при выражении результатов эксперимента полиномом:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_5x_5 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{14}x_1x_4 + b_{15}x_1x_5 + b_{23}x_2x_3 + b_{24}x_2x_4 + b_{25}x_2x_5 + b_{34}x_3x_4 + b_{35}x_3x_5 + b_{45}x_4x_5 \quad 2.3$$

где $\lg(Pz) = y$, x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 – кодированные значения факторов.

Для оценки коэффициентов полинома, используя полуреплику 2^{5-1} от полнофакторного эксперимента 2^5 , поставили 16 опытов.

Принятые уровни факторов выбраны в соответствии с предполагаемыми условиями обработки на специальном приставном оборудовании и представлены в таблице 2.5.

Таблица 2.5

Факторы и их уровни

Факторы	Кодовое обозначение факторов	Уровни факторов		
		Верхний +1	Основной 0	Нижний -1
Глубина резания, мм	x_1	4	2,5	1
Подача, мм/зуб	x_2	0,35	0,2	0,05
Ширина резания, мм	x_3	40	36	32
Частота вращения, мин ⁻¹	x_4	1250	1000	750
Диаметр фрезы, мм	x_5	60	50	40

Кодированные значения факторов вычисляли по следующим соотношениям:

$$x_1 = \frac{2(\lg t - \lg t_{\max})}{\lg t_{\max} - \lg t_{\min}} + 1, \quad x_2 = \frac{2(\lg s_z - \lg s_{z\max})}{\lg s_{z\max} - \lg s_{z\min}} + 1, \quad x_3 = \frac{2(\lg B - \lg B_{\max})}{\lg B_{\max} - \lg B_{\min}} + 1,$$

$$x_4 = \frac{2(\lg n - \lg n_{\max})}{\lg n_{\max} - \lg n_{\min}} + 1, \quad x_5 = \frac{2(\lg D - \lg D_{\max})}{\lg D_{\max} - \lg D_{\min}} + 1, \quad 2.4$$

где x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 – кодированные значения факторов, t, s_z, B, n, D – натуральные значения факторов в центре плана, $t_{\max}, s_{z\max}, B_{\max}, n_{\max}, D_{\max}$ – натуральные значения верхнего уровня факторов, $t_{\min}, s_{z\min}, B_{\min}, n_{\min}, D_{\min}$ – натуральные значения нижнего уровня факторов.

По полученной матрице с использованием представленного оборудования и инструмента поставлен эксперимент с 16 опытами. Матрица планирования и результаты опытов приведены в таблице 2.6.

Таблица 2.6

Матрица плана эксперимента

№	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	$x_1 x_2$	$x_1 x_3$	$x_1 x_4$	$x_1 x_5$	$x_2 x_3$	$x_2 x_4$	$x_2 x_5$	$x_3 x_4$	$x_3 x_5$	$x_4 x_5$	Pz	$y(\lg Pz)$
1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	40,1	3,692
2	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	180,3	5,195
3	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	1	1	126,5	4,84
4	1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	297,1	5,694
5	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	-1	-1	1	69,4	4,239
6	1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	162,9	5,093
7	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	114,3	4,739
8	1	1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	513,7	6,242
9	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	1	-1	49,7	3,906
10	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	116,8	4,76
11	1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	81,9	4,406
12	1	1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	368,2	5,909
13	1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	44,9	3,805
14	1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	201,9	5,308
15	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	1	-1	141,7	4,953
16	1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	332,7	5,807

На рис. 2.5-2.7 представлены фрагменты результатов измерения составляющих силы резания, полученные с использованием прибора KISTLER TYPE5070A (режим №13).

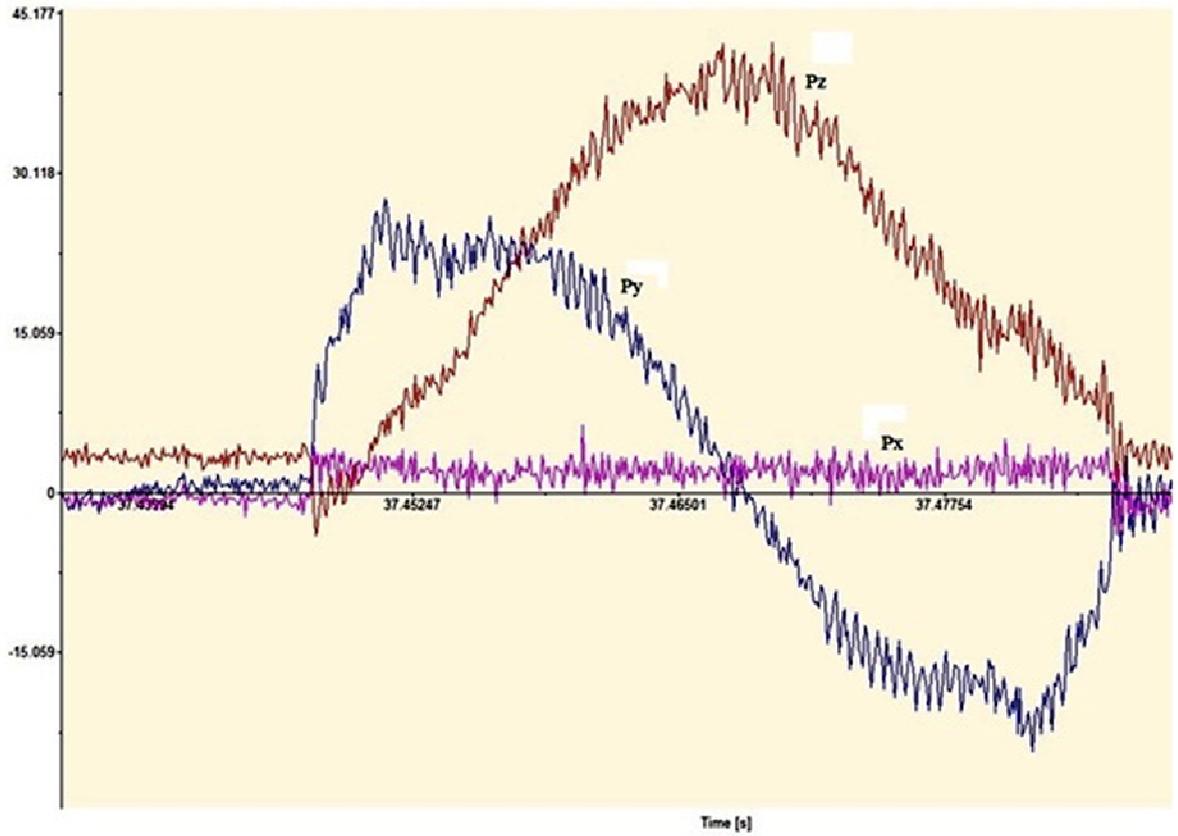


Рис.2.5. Составляющие силы резания за один элементарный рез

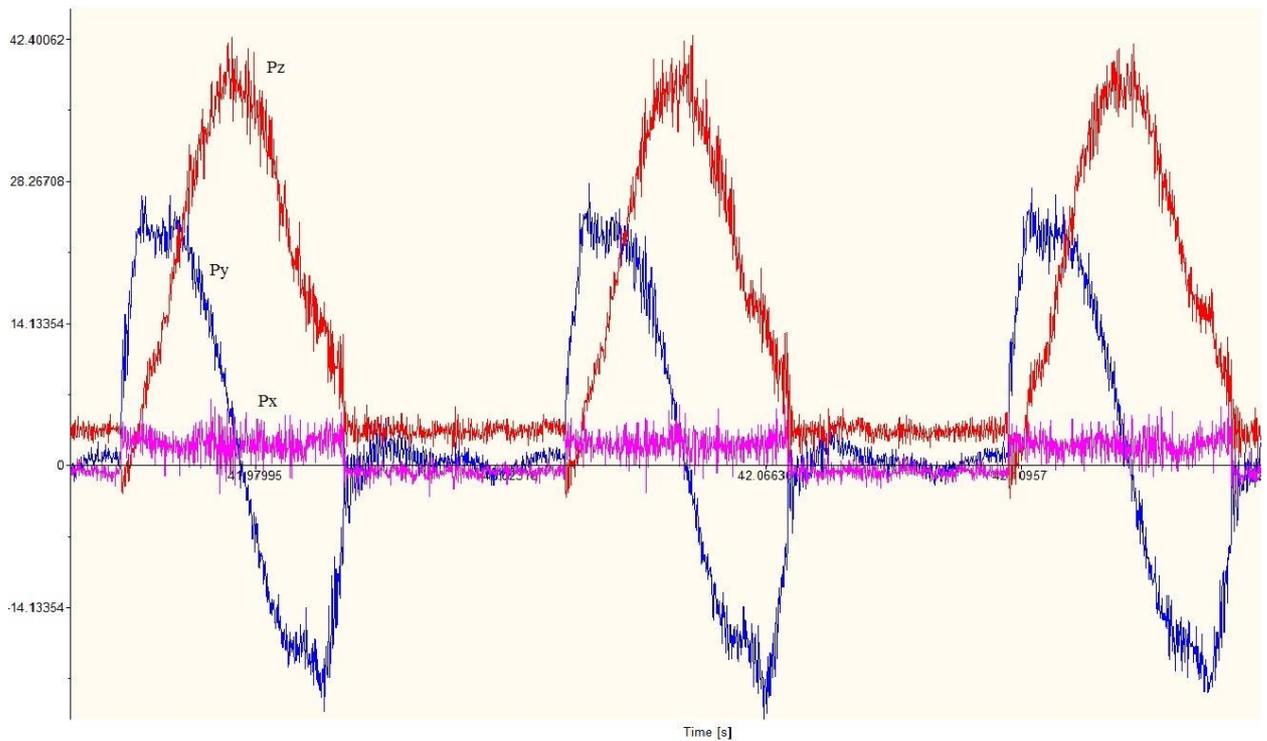


Рис. 2.6. Составляющие силы резания за три оборота фрезы

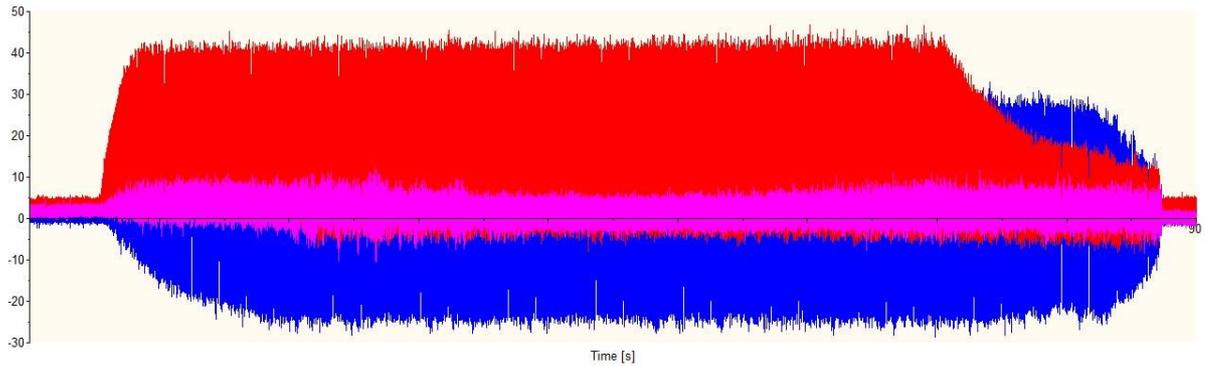


Рис. 2.7. Составляющие силы резания при фрезеровании

При отсутствии дублирования опытов для вычисления дисперсии воспроизводимости эксперимента выполнили шесть параллельных опытов в нулевой точке (в центре плана). По результатам опытов в центре плана вычислили дисперсию воспроизводимости эксперимента:

$$s_y^2 = \frac{1}{n_0 - 1} \sum_{u=1}^{n_0} (y_u - \bar{y})^2 \quad 2.5$$

где n_0 – число параллельных опытов в нулевой точке; y_u – значение параметра в u -м опыте; \bar{y} – среднее арифметическое значение параметра в n_0 параллельных опытах.

По результатам полной серии опытов вычислили коэффициенты полинома. Свободный член b_0 определили по формуле:

$$b_0 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N y_j \quad 2.6$$

Коэффициенты регрессии, характеризующие линейные эффекты, вычислили по выражению:

$$b_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_{ij} y_j \quad 2.7$$

Коэффициенты регрессии, характеризующие эффекты взаимодействия, определили по формуле:

$$b_{il} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_{ij} x_{lj} y_j \quad 2.8$$

где i, l – номера факторов; j – номер опыта в матрице планирования; y_j – значение параметра в j -м опыте; x_{ij}, x_{lj} – кодированные значения факторов i и l в j -м опыте.

Вычислив коэффициенты модели, проверяем их статистическую значимость сравнением с абсолютным значения доверительного интервала Δb . Коэффициент b_i уравнения регрессии считается значимым, если $|b_i| \geq \Delta b$.

Доверительный интервал вычисляем с использованием критерия Стьюдента:

$$\Delta b = \pm t s\{b_i\}, \quad s^2\{b_i\} = \frac{s^2_y}{N} \quad 2.9$$

где t – критерий Стьюдента; $S\{b_i\}$ – дисперсии коэффициентов регрессии; N – число опытов в матрице планирования.

Для 5% уровня значимости с числом степеней свободы равным 5 критерий Стьюдента $t=2,78$, таким образом доверительный интервал $\Delta b=0,051$.

В табл. 2.7 и 2.8 представлены значимые и незначимые коэффициенты. Коэффициенты парных членов незначимы, поэтому исключим их.

Таблица 2.7

Значимые коэффициенты модели

Коэффициент	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5
Значение	4,912	0,59	0,411	0,111	-0,054	-0,161

Таблица 2.8

Незначимые коэффициенты модели

Коэффициент	b_{12}	b_{13}	b_{14}	b_{15}	b_{23}
Значение	$6,25 \cdot 10^{-5}$	$-1,313 \cdot 10^{-3}$	$6,25 \cdot 10^{-5}$	$-4,375 \cdot 10^{-4}$	$1,313 \cdot 10^{-3}$
Коэффициент	b_{24}	b_{25}	b_{34}	b_{35}	b_{45}
Значение	$-6,25 \cdot 10^{-5}$	$-6,25 \cdot 10^{-5}$	$1,187 \cdot 10^{-3}$	$-1,437 \cdot 10^{-3}$	$-6,25 \cdot 10^{-5}$

С учетом значимых коэффициентов уравнение регрессии 2.3 принимает вид:

$$y = 4,912 + 0,59x_1 + 0,411x_2 + 0,111x_3 - 0,054x_4 - 0,161x_5 \quad 2.10$$

Согласно полученной модели сила резания возрастает с увеличением глубины резания, подачи, и ширины фрезерования и уменьшается с увеличением частоты вращения и диаметра фрезы, при этом наибольшее влияние оказывают глубина резания и подача, что соответствует традиционным положениям.

Проверку адекватности модели проводим по F-критерию Фишера. Расчетное значение критерия Фишера:

$$F_p = \frac{S_{ad}^2}{S_y^2} \quad 2.11$$

где s_{ad}^2 – дисперсия адекватности, оценивающая рассеивание опытных значений относительно расчетных в основном многофакторном опыте; s_y^2 – дисперсия опыта, оценивающая рассеивание опытных значений одной выборки в центре плана относительно их среднеарифметического.

где y_p – расчетные значения в основном многофакторном опыте; y_i – экспериментальные значения в основном многофакторном опыте; f – число степеней свободы.

$$S_{ad}^2 = \frac{\sum_{j=1}^N (y_{эj} - y_{pj})^2}{f} = \frac{\sum_{j=1}^N (y_{эj} - y_{pj})^2}{N - (k + 1)} \quad 2.12$$

где $y_{эj}$ – наблюдаемые значения параметра в j -ом опыте; y_{pj} – значения параметра, вычисленные по модели для условий j -го опыта; f – число степеней свободы, равное $N - (k + 1)$, N – число опытов, k – число факторов.

Табличный критерий Фишера при 5% уровне значимости и 10 степенях свободы равен $F_T = 4.85$. Так как расчетное значение критерия Фишера $F_p = 2.8$ меньше табличного, то зависимость тангенциальной составляющей силы резания от исследуемых параметров с достаточной

точностью можно аппроксимировать уравнением степенного вида. В результате перехода от кодированных значений факторов к натуральным получили уравнение:

$$\lg(Pz) = 5,818 + 0,852 \lg t + 0,748 \lg s_z + 0,998 \lg B - 0,098 \lg n - 0,794 \lg D \quad 2.13$$

Потенцируем уравнение 2.13 и получаем искомую аналитическую зависимость тангенциальной составляющей силы резания при фрезеровании баббита:

$$Pz = 336 \frac{t^{0,85} s_z^{0,75} B^1}{n^{0,1} D^{0,8}} \quad 2.14$$

На рис. 2.8–2.10 представлены графические зависимости тангенциальной составляющей силы резания при различном сочетании технологических параметров.

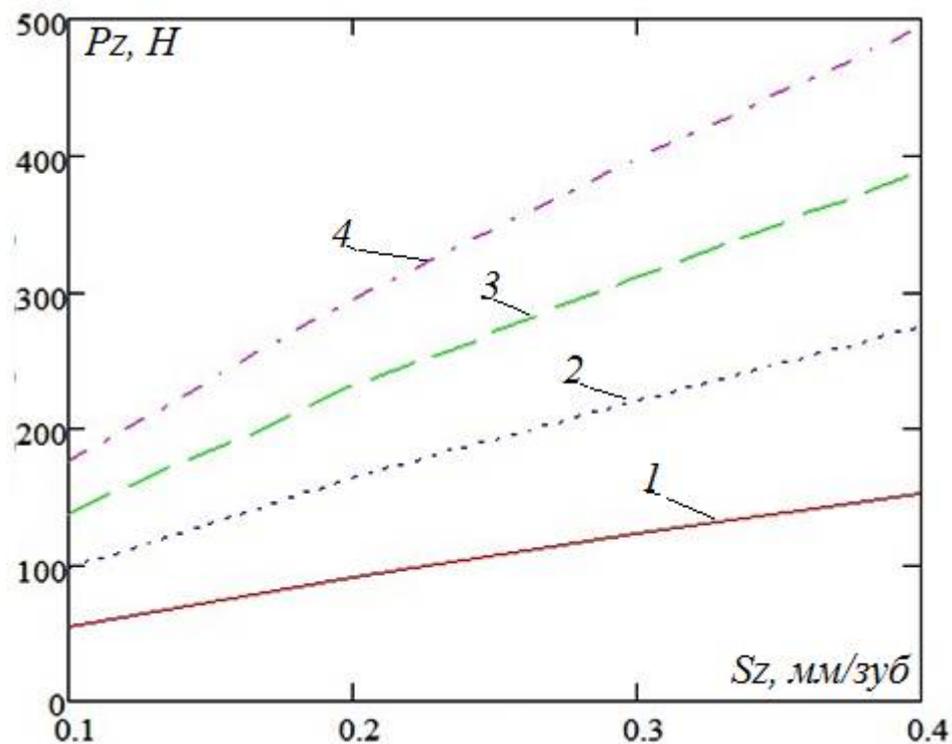


Рис. 2.8, а. Зависимость тангенциальной составляющей силы резания от подачи при фрезеровании баббита ($D=40$ мм, $B=32$ мм, $n=500$ об/мин):

1— $t=1$ мм; 2— $t=2$ мм; 3— $t=3$ мм; 4— $t=4$ мм

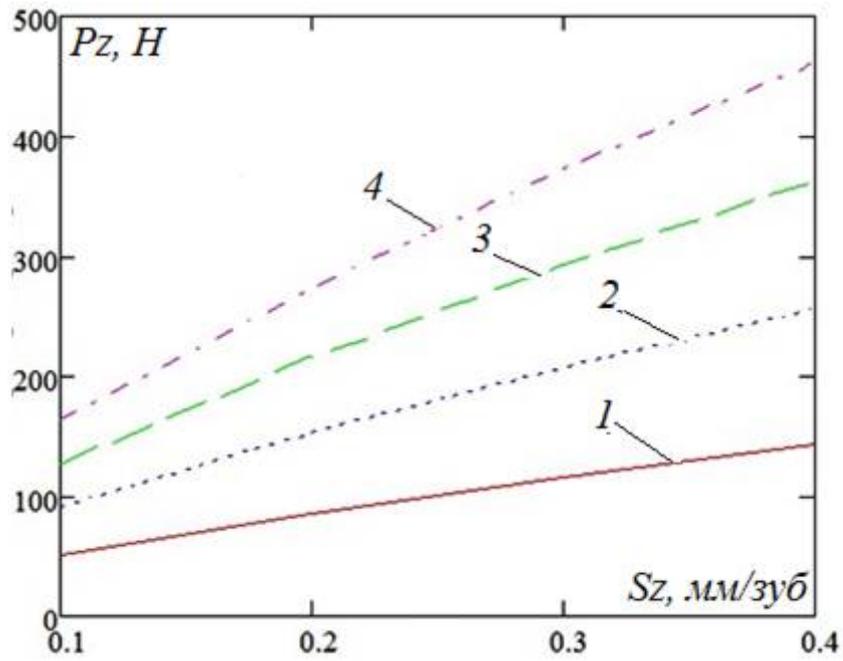


Рис. 2.8, б. Зависимость тангенциальной составляющей силы резания от подачи при фрезеровании баббита ($D=40$ мм, $B=32$ мм, $n=1500$ об/мин):

$1-t=1$ мм; $2-t=2$ мм; $3-t=3$ мм; $4-t=4$ мм

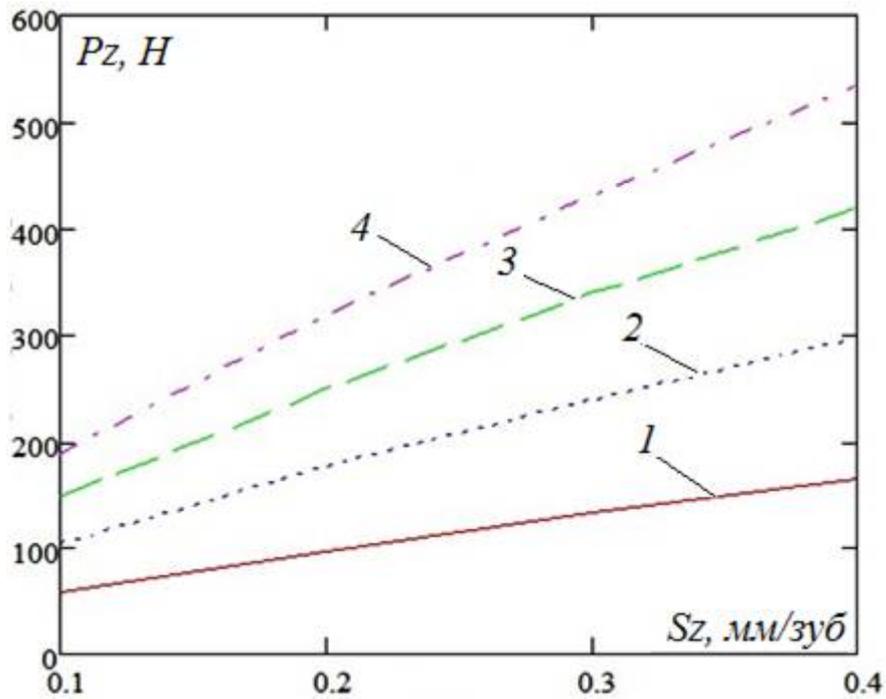


Рис. 2.9, а. Зависимость тангенциальной составляющей силы резания от подачи при фрезеровании баббита ($D=60$ мм, $B=48$ мм, $n=500$ об/мин):

$1-t=1$ мм; $2-t=2$ мм; $3-t=3$ мм; $4-t=4$ мм

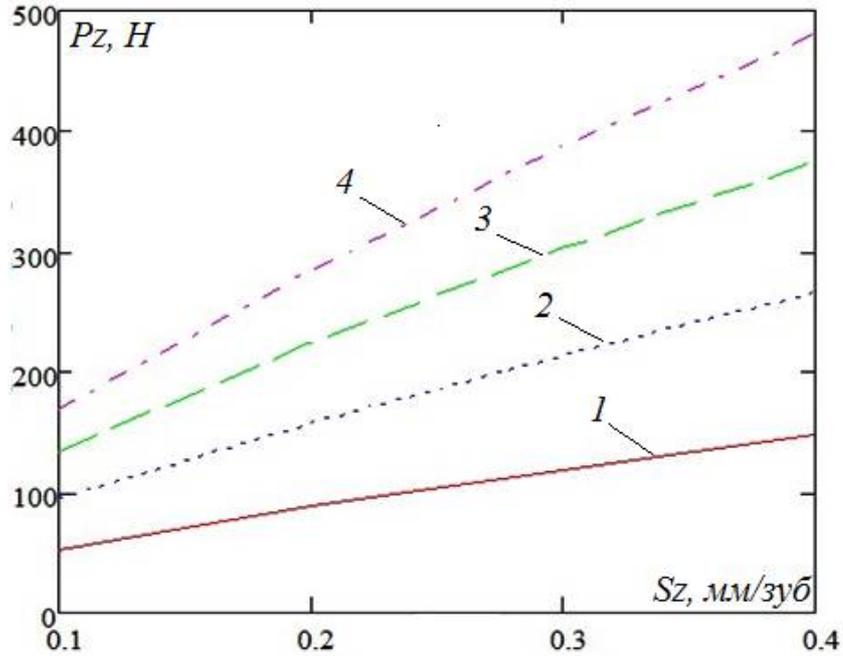


Рис. 2.9, б. Зависимость тангенциальной составляющей силы резания от подачи при фрезеровании баббита ($D=60$ мм, $B=48$ мм, $n=1500$ об/мин):

1- $t=1$ мм; 2- $t=2$ мм; 3- $t=3$ мм; 4- $t=4$ мм

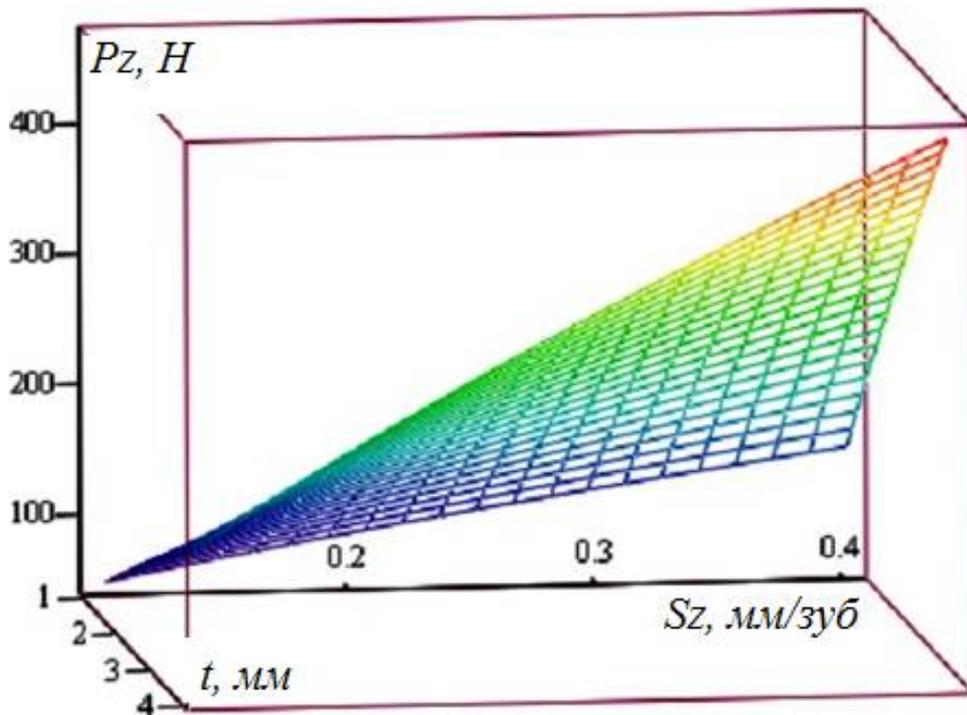


Рис. 2.10. Изменение тангенциальной составляющей силы резания при фрезеровании баббита ($D=50$ мм, $B=40$ мм, $n=1500$ об/мин) от глубины резания

$t=1-4$ мм и подачи на зуб $S_z=0,05-0,4$ мм/зуб

Анализируя графики изменения силы резания, представленные на рис.2.8-2.9, можно сделать вывод, что сила резания для анализируемых диаметров фрез в заданном диапазоне изменения технологических параметров лежит в интервале 50-500 Н. Наибольшее влияние оказывает глубина резания и подача, наблюдается прямо пропорциональная линейная зависимость между увеличением глубины резания и подачи и силой резания. Изменение ширины фрезерования, диаметра фрезы и частоты вращения оказывает незначительное влияние. Увеличение частоты вращения несколько снижает силу резания, а увеличение ширины фрезерования и диаметра фрезы – несколько увеличивает.

На рис. 2.11 представлены графические зависимости эффективной мощности резания при различном сочетании технологических параметров. Максимальная требуемая мощность составляет 1,5-2 кВт.

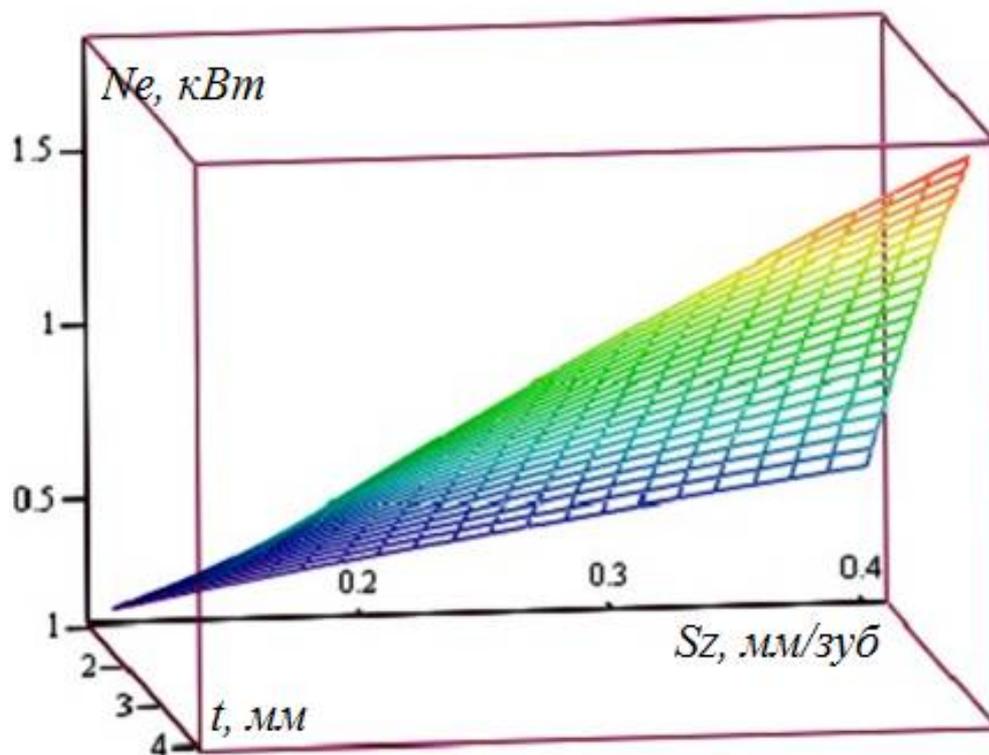


Рис. 2.11,а. Изменение мощности резания при фрезеровании баббита ($D=50$ мм, $B=40$ мм, $n=1500$ об/мин) от глубины резания $t=1-4$ мм и подачи на зуб $S_z=0,05-0,4$ мм/зуб

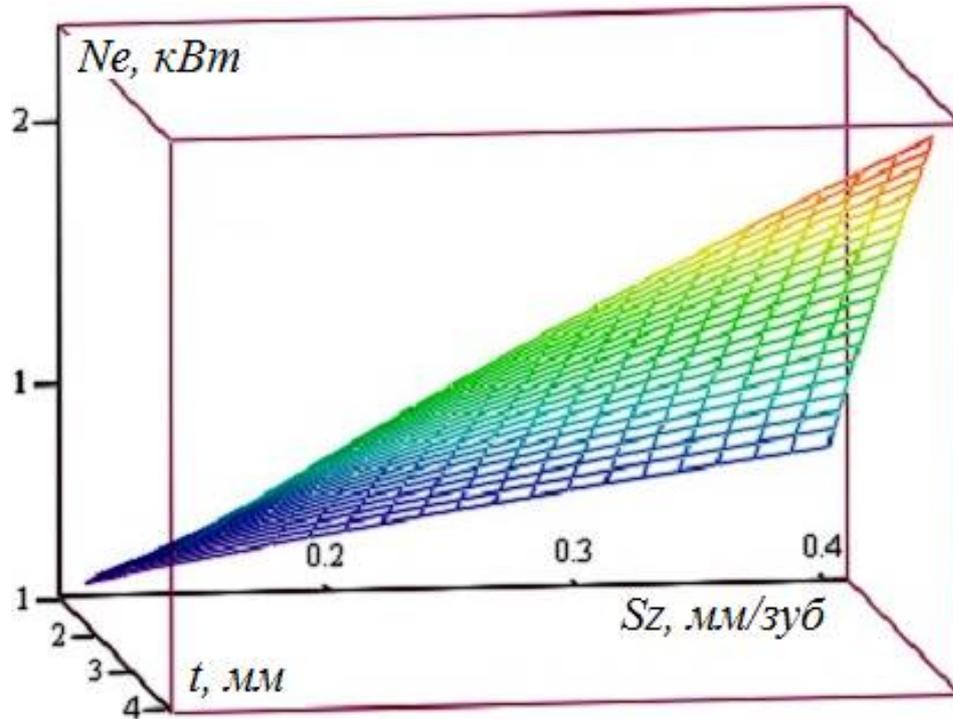


Рис. 2.11,б. Изменение мощности резания при фрезеровании баббита ($D=60$ мм, $B=48$ мм, $n=1500$ об/мин) от глубины резания $t=1-4$ мм и подачи на зуб $Sz=0,05-0,4$ мм/зуб

2.3. Разработка эмпирических моделей температуры резания при фрезеровании баббитов на оловянной и свинцовой основе

Температура в зоне резания оказывает значительное влияние на получаемую шероховатость. В связи с низкой температурой плавления и размягчением баббита при фрезеровании на повышенных режимах резания наблюдается налипание обрабатываемого материала на фрезу, что приводит к значительному снижению качества обработанной поверхности [98, 99]. Целью исследования является выявление зависимости температуры резания при фрезеровании баббитов Б16 и Б83 от технологических параметров [6, 7]. Для достижения поставленной цели был проведен натурный эксперимент. Для определения температуры резания использован тепловизор TVS 110 (рис.2.12).



Рис. 2.13. Тепловизор TVS 110

Прибор имеет следующие характеристики:

- диапазон измерения температур $0 \dots 350 \text{ C}^0$;
- погрешность измерения $\pm 2\%$ от измеряемого значения;
- размер изображения 640×480 пикселей;
- частота обновления 8-15 Гц.

Решение данной задачи потребовало проведения математического планирования эксперимента.

Изменение температуры резания в зависимости от технологических параметров представим уравнением регрессии степенного вида:

$$Tr = C \cdot t^{\alpha_1} \cdot s_z^{\alpha_2} \cdot B^{\alpha_3} \cdot n^{\alpha_4} \cdot D^{\alpha_5} \quad 2.15$$

где C – коэффициент; $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5$ – показатели степени при каждом факторе (степени влияния каждого фактора).

После логарифмирования уравнение (2.15) линеаризуется:

$$\lg(Tr) = \lg C + \alpha_1 \lg t + \alpha_2 \lg s_z + \alpha_3 \lg B + \alpha_4 \lg n + \alpha_5 \lg D \quad 2.16$$

Возможность аппроксимации зависимости (2.26) установим проверкой гипотезы адекватности линейной модели при выражении результатов эксперимента полиномом:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_5x_5 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{14}x_1x_4 + b_{15}x_1x_5 + b_{23}x_2x_3 + b_{24}x_2x_4 + b_{25}x_2x_5 + b_{34}x_3x_4 + b_{35}x_3x_5 + b_{45}x_4x_5 \quad 2.17$$

где $\ln(Tr) = y$, x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 – кодированные значения факторов.

Кодированные значения факторов вычислялись по выражениям 2.4.

Для оценки коэффициентов полинома, используя полуреплику 2^{5-1} от полнофакторного эксперимента 2^5 , поставили 16 опытов.

Принятые уровни факторов выбраны аналогично эксперименту по измерению силы резания, представлены в табл. 2.9. Матрица планирования и результаты опытов приведены в таблице 2.10.

Дисперсия воспроизводимости эксперимента находится по результатам шести параллельных опытов в центре плана согласно выражению 2.5.

Коэффициенты уравнения регрессии вычислялись по выражениям 2.6-2.8. Значимость коэффициентов определялась сравнением с величиной доверительного интервала с использованием критерия Стьюдента согласно выражению 2.9. Для 5% уровня значимости с числом степеней свободы равным 5 критерий Стьюдента $t=2,78$, таким образом доверительный интервал $\Delta b=0,051$. Полученные значения коэффициентов представлены в табл.2.11, 2.12.

Таблица 2.9

Факторы и их уровни

Факторы	Кодовое обозначение факторов	Уровни факторов		
		Верхний +1	Основной 0	Нижний -1
Глубина резания, мм	x_1	3	2	1
Подача, мм/зуб	x_2	0,25	0,15	0,05
Ширина резания, мм	x_3	40	36	32
Частота вращения, мин ⁻¹	x_4	1250	1000	750
Диаметр фрезы, мм	x_5	60	50	40

Таблица 2.10

Матрица плана эксперимента

№	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	$x_1 x_2$	$x_1 x_3$	$x_1 x_4$	$x_1 x_5$	$x_2 x_3$	$x_2 x_4$	$x_2 x_5$	$x_3 x_4$	$x_3 x_5$	$x_4 x_5$	Tr (Б16)	Tr (Б83)
1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	21	30
2	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	47	75
3	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	1	1	70	115
4	1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	69	121
5	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	-1	-1	1	39	56
6	1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	38	62
7	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	57	95
8	1	1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	131	237
9	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	1	-1	42	55
10	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	41	61
11	1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	61	94
12	1	1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	140	233
13	1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	34	46
14	1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	78	114
15	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	1	-1	118	176
16	1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	114	194

Таблица 2.11

Значимые коэффициенты модели

Коэффициент	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5
Значение (Б16)	4,089	0,202	0,401	0,113	0,153	-0,219
Значение (Б83)	4,546	0,262	0,462	0,106	0,097	-0,206

Таблица 2.12

Незначимые коэффициенты модели

Коэффициент	b_{12}	b_{13}	b_{14}	b_{15}	b_{23}
Значение (Б16)	$1,7 \cdot 10^{-3}$	$6,2 \cdot 10^{-4}$	$-4,3 \cdot 10^{-3}$	$3,1 \cdot 10^{-3}$	$-3,2 \cdot 10^{-3}$
Значение (Б83)	$-4,4 \cdot 10^{-3}$	$-5,6 \cdot 10^{-3}$	$-6,8 \cdot 10^{-3}$	$-6,7 \cdot 10^{-3}$	$1,9 \cdot 10^{-3}$
Коэффициент	b_{24}	b_{25}	b_{34}	b_{35}	b_{45}
Значение (Б16)	$6,9 \cdot 10^{-3}$	$-5,6 \cdot 10^{-3}$	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$-6,3 \cdot 10^{-4}$	$4,4 \cdot 10^{-3}$
Значение (Б83)	$5,7 \cdot 10^{-3}$	$3,1 \cdot 10^{-3}$	$4,3 \cdot 10^{-3}$	$4,2 \cdot 10^{-3}$	$8,1 \cdot 10^{-3}$

С учетом значимых коэффициентов уравнение регрессии 2.18 принимает вид:

для баббита Б16

$$y = 4,089 + 0,202x_1 + 0,401x_2 + 0,113x_3 + 0,153x_4 - 0,219x_5 \quad 2.19$$

для баббита Б83

$$y = 4,546 + 0,262x_1 + 0,462x_2 + 0,106x_3 + 0,097x_4 - 0,206x_5 \quad 2.20$$

Согласно полученной модели температура резания аналогично силе резания возрастает с увеличением глубины резания, подачи и ширины фрезерования и уменьшается с увеличением частоты вращения и диаметра фрезы, при этом наибольшее влияние оказывают глубина резания и подача, что соответствует традиционным положениям [35].

Проверку адекватности модели проводим по F-критерию Фишера согласно выражений 2.11, 2.12.

Табличный критерий Фишера при 5% уровне значимости и 10 степенях свободы равен $F_T = 4.85$. Расчетное значение критерия Фишера для баббита Б16 $F_p = 3.7$ и для баббита Б83 $F_p = 4.2$, оба значения меньше табличного, то зависимость температуры резания от исследуемых параметров с достаточной точностью можно аппроксимировать уравнением

степенного вида. В результате перехода от кодированных значений факторов к натуральным получили уравнения:

для баббита Б16

$$\lg(Tr) = 1,44 + 0,291\lg t + 0,498\lg s_z + 1,014\lg B + 0,6\lg n - 1,082\lg D \quad 2.21$$

для баббита Б83

$$\lg(Tr) = 3,494 + 0,477\lg t + 0,574\lg s_z + 0,947\lg B + 0,379\lg n - 1,014\lg D \quad 2.22$$

Потенцируем уравнения (2.22) и получаем искомые аналитические зависимости температуры резания:

при фрезеровании баббита Б16

$$Tr = 4,22 \frac{t^{0,29} \cdot s_z^{0,5} \cdot B \cdot n^{0,6}}{D^{1,08}} \quad 2.23$$

при фрезеровании баббита Б83

$$Tr = 33 \frac{t^{0,47} \cdot s_z^{0,57} \cdot B^{0,95} \cdot n^{0,38}}{D} \quad 2.24$$

На рис.2.14–2.17 представлены графические зависимости температуры резания при различном сочетании технологических параметров.

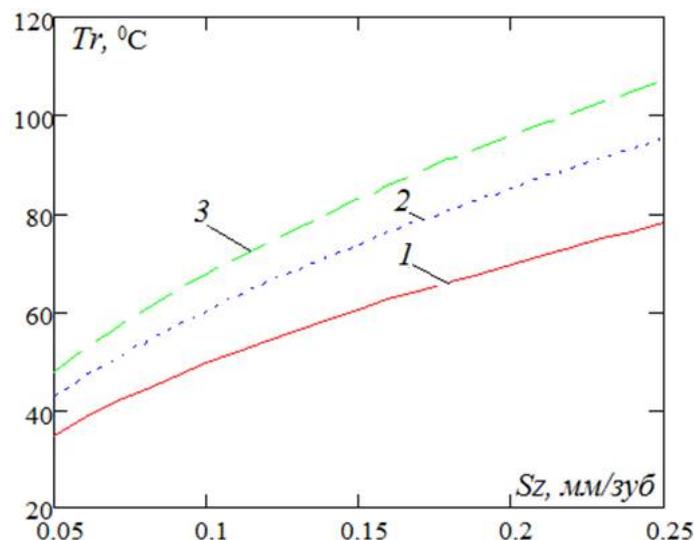


Рис. 2.14, а. Изменение температуры резания при фрезеровании баббита Б16 от подачи на зуб, мм/зуб ($B=40$ мм, $n=1000$ об/мин, $D=50$ мм):

1 - $t=1$ мм, 2 - $t=2$ мм, 3 - $t=3$ мм

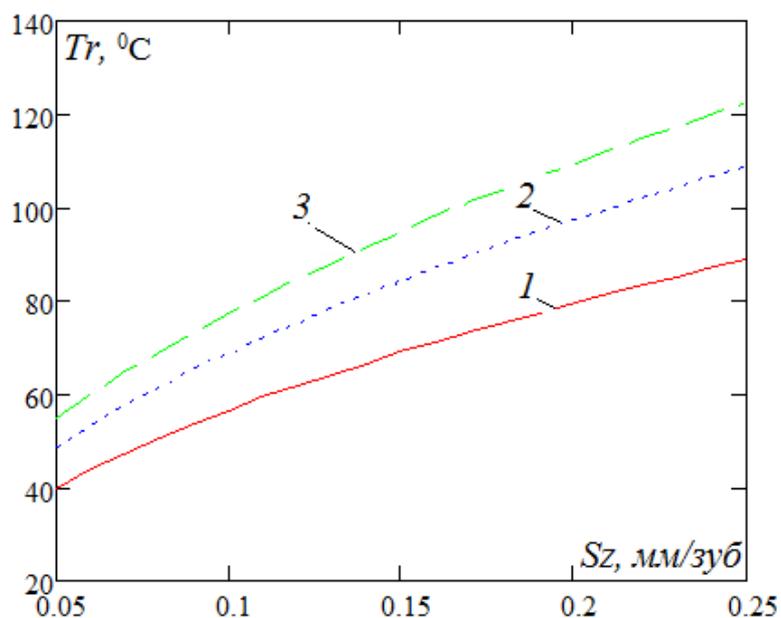


Рис. 2.14, б. Изменение температуры резания при фрезеровании баббита Б16 от подачи на зуб, мм/зуб ($B=40$ мм, $n=1250$ об/мин, $D=50$ мм):

1 - $t=1$ мм, 2 - $t=2$ мм, 3 - $t=3$ мм

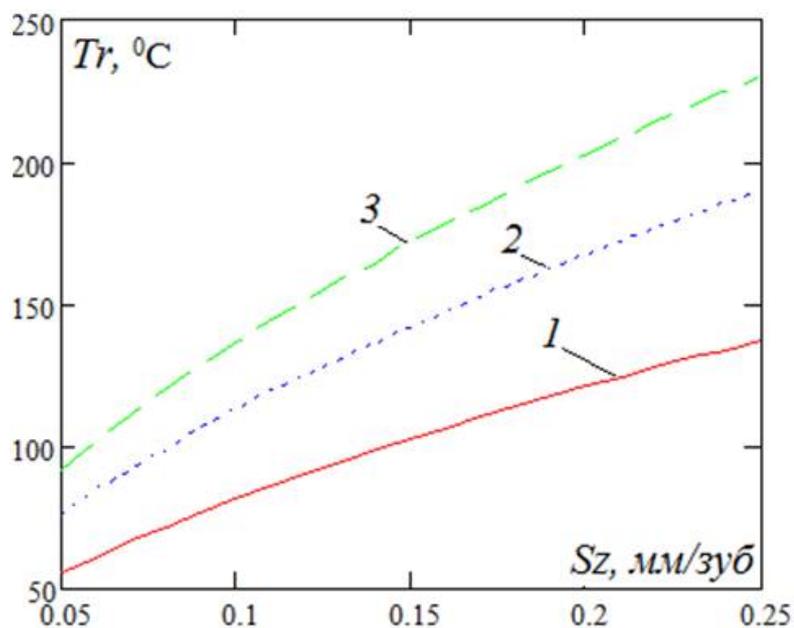


Рис. 2.15, а. Изменение температуры резания при фрезеровании баббита Б83 от подачи на зуб, мм/зуб ($B=40$ мм, $n=1000$ об/мин, $D=50$ мм):

1 - $t=1$ мм, 2 - $t=2$ мм, 3 - $t=3$ мм:

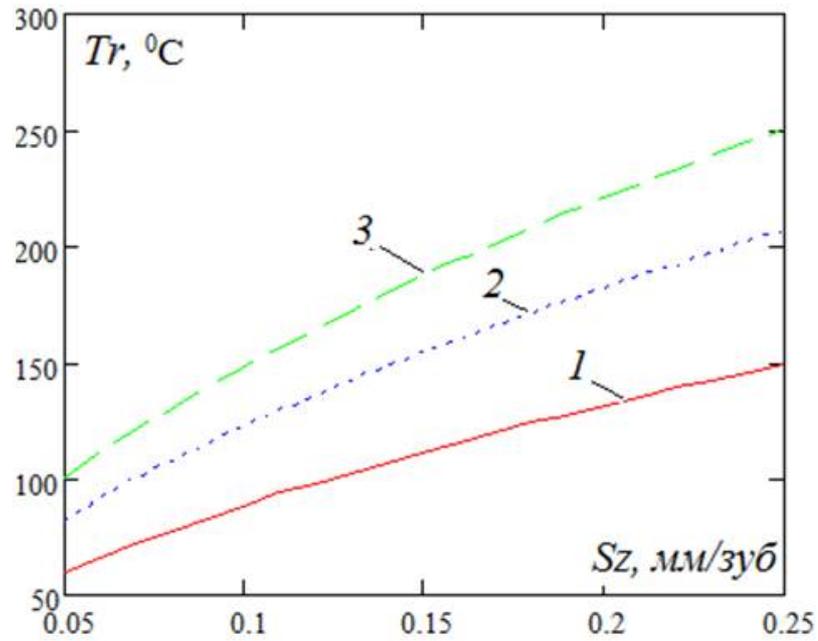


Рис. 2.15, б. Изменение температуры резания при фрезеровании баббита Б83 от подачи на зуб, мм/зуб ($B=40$ мм, $n=1250$ об/мин, $D=50$ мм):

1 - $t=1$ мм, 2 - $t=2$ мм, 3 - $t=3$ мм

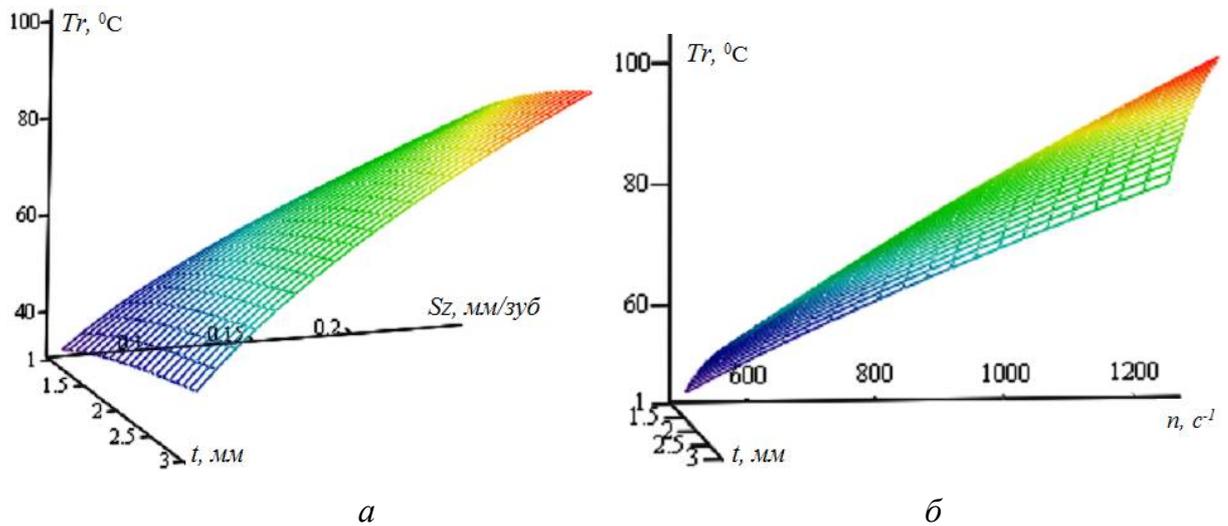


Рис. 2.16. Изменение температуры резания при фрезеровании баббита Б16 при $B=40$ мм, $n=1250$ об/мин, $D=50$ мм: а – от подачи на зуб и глубины резания; б - от частоты вращения фрезы и глубины резания

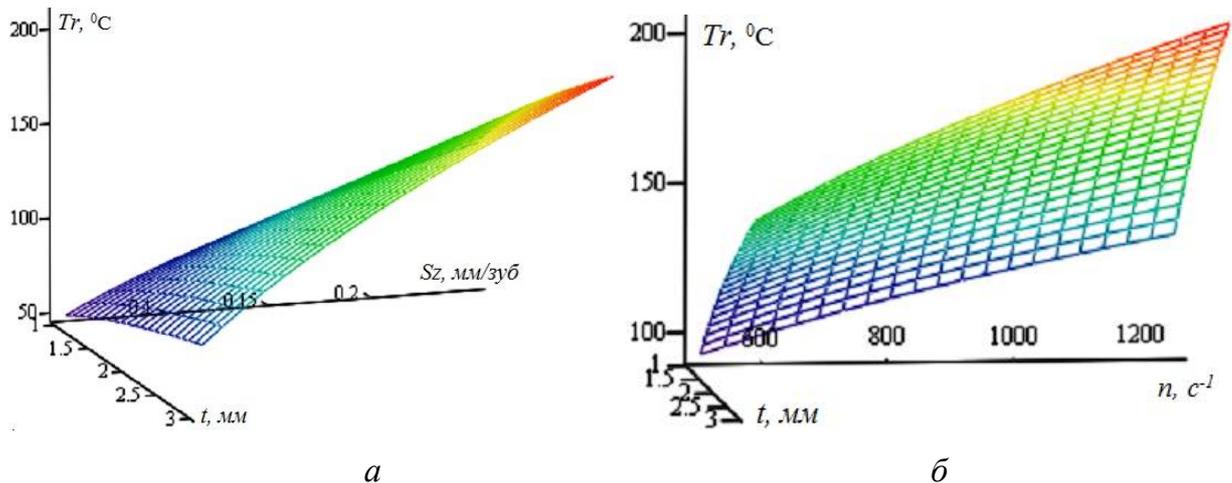


Рис. 2.17. Изменение температуры резания при фрезеровании баббита Б83 при $B=40$ мм, $n=1250$ об/мин, $D=50$ мм: *а* – от подачи на зуб и глубины резания; *б* - от частоты вращения фрезы и глубины резания

Анализируя графики изменения температуры резания, представленные на рис. 2.14–2.17 можно сделать вывод, что температура резания для анализируемых диаметров фрез в заданном диапазоне изменения технологических параметров лежит в интервале 30-150 °С. Максимальная температура в заданном интервале наблюдается при максимальной глубине резания и подаче (4 мм, 0,3 мм/зуб). Наибольшее влияние оказывает глубина резания и подача, наблюдается прямо пропорциональная зависимость между увеличением глубины резания и подачи и возрастанием температуры резания. Изменение ширины фрезерования, диаметра фрезы и частоты вращения оказывает несущественное влияние. Увеличение частоты вращения несколько снижает силу резания.

На рис. 2.18, 219 в качестве фрагмента измерения теплового поля при фрезеровании баббитов на оловянной и свинцовой основе представлены термограммы и температурный профиль заготовки для условий опыта №4. На термограммах отчетливо видны особенности теплового состояния различных марок баббитов.

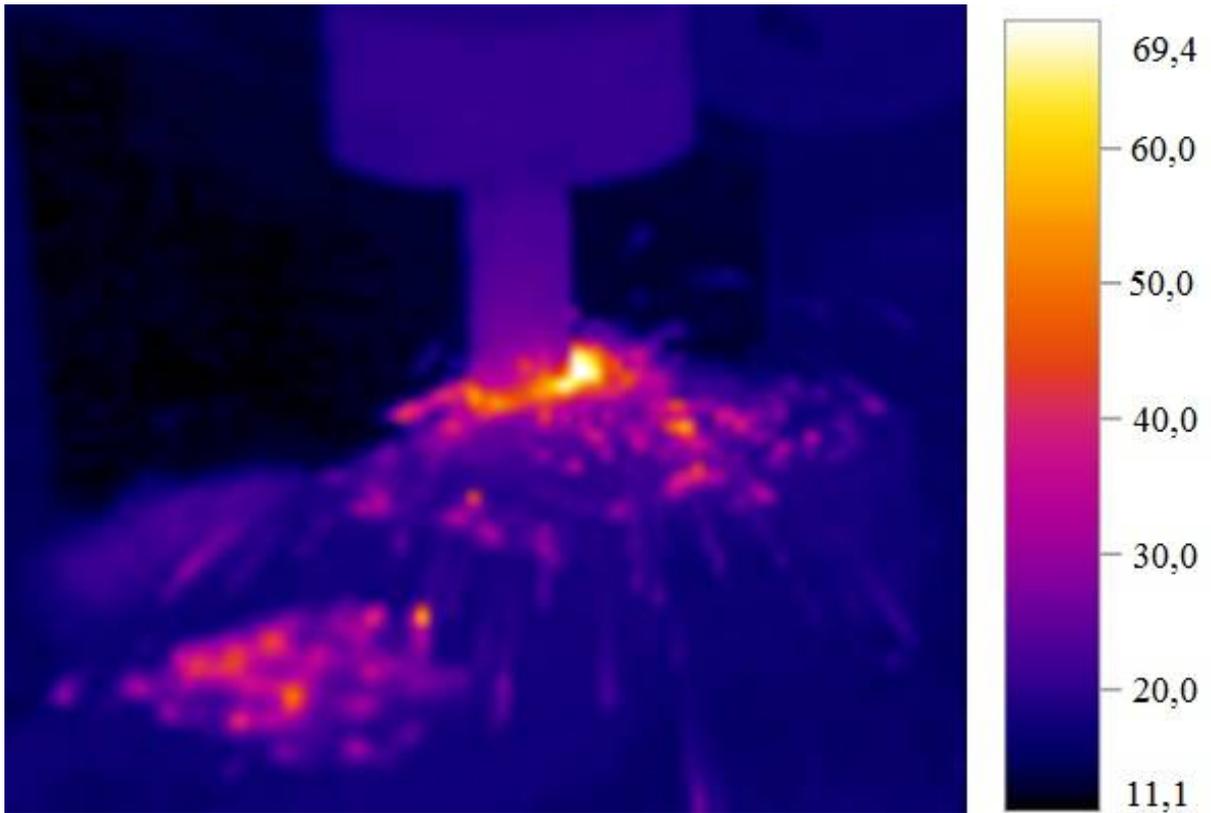
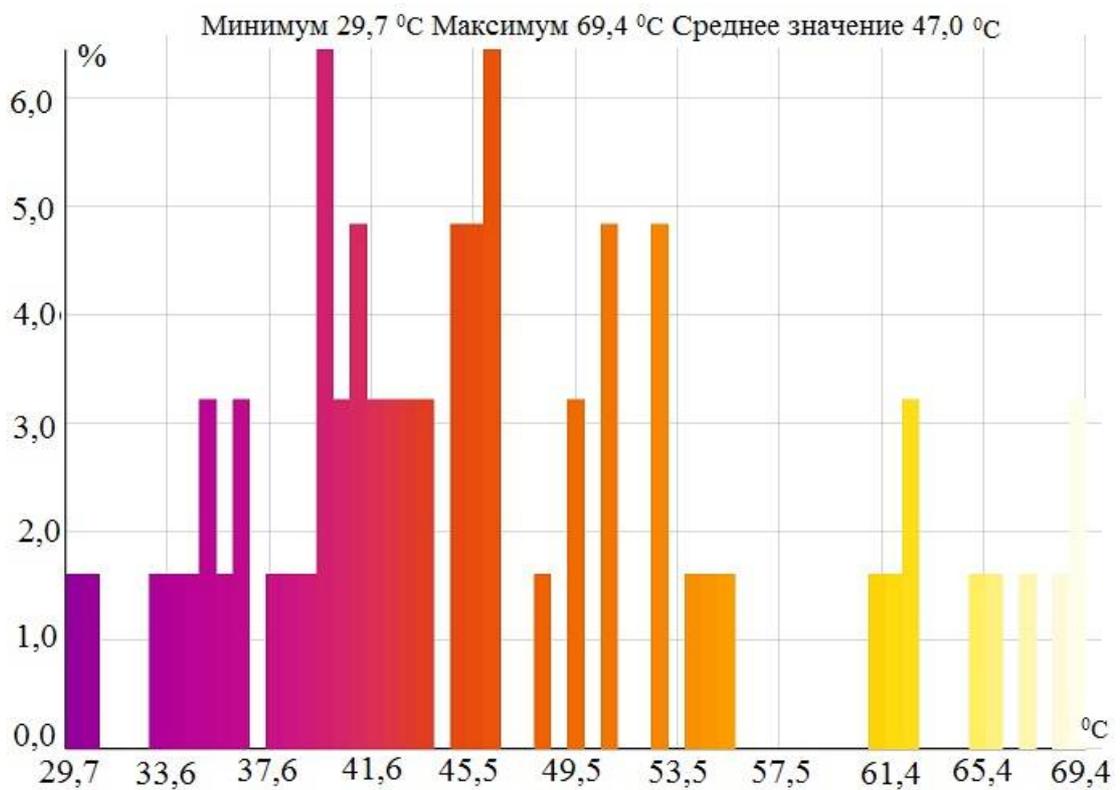
a*б*

Рис. 2.18. Тепловое поле при фрезеровании баббита Б16: *a* – термограмма, *б* – температурный профиль заготовки

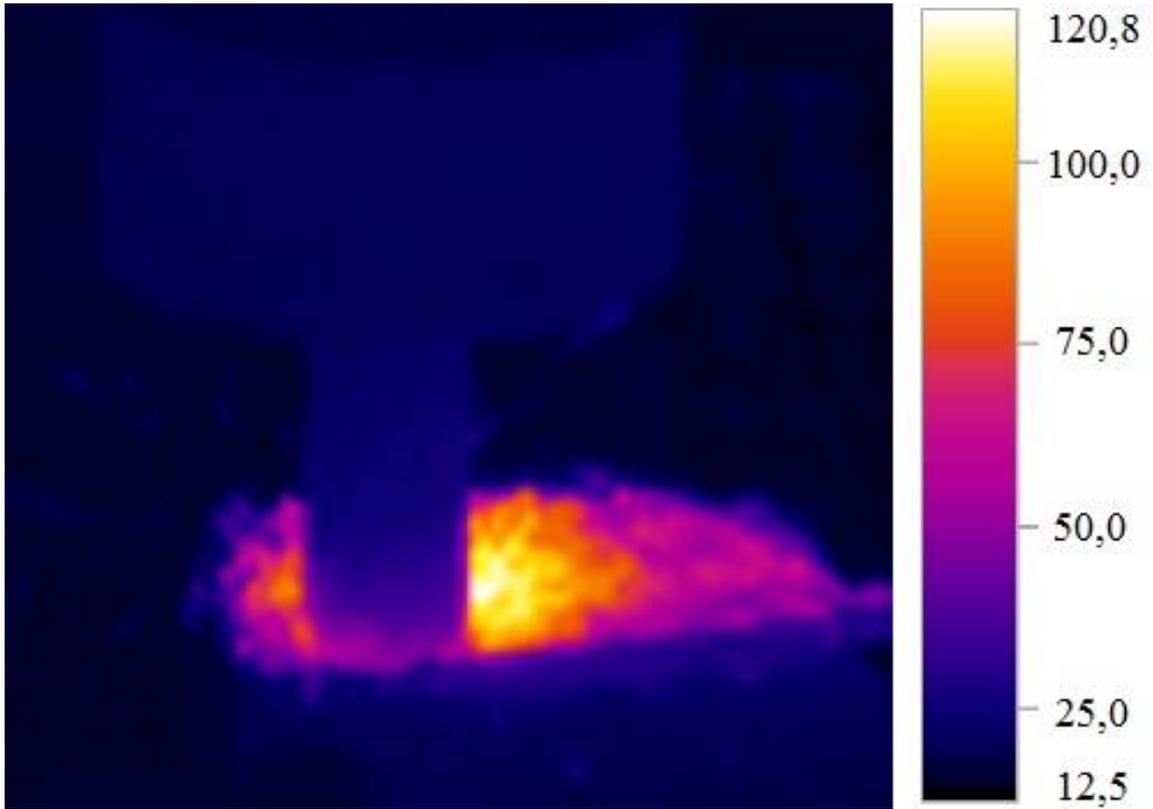
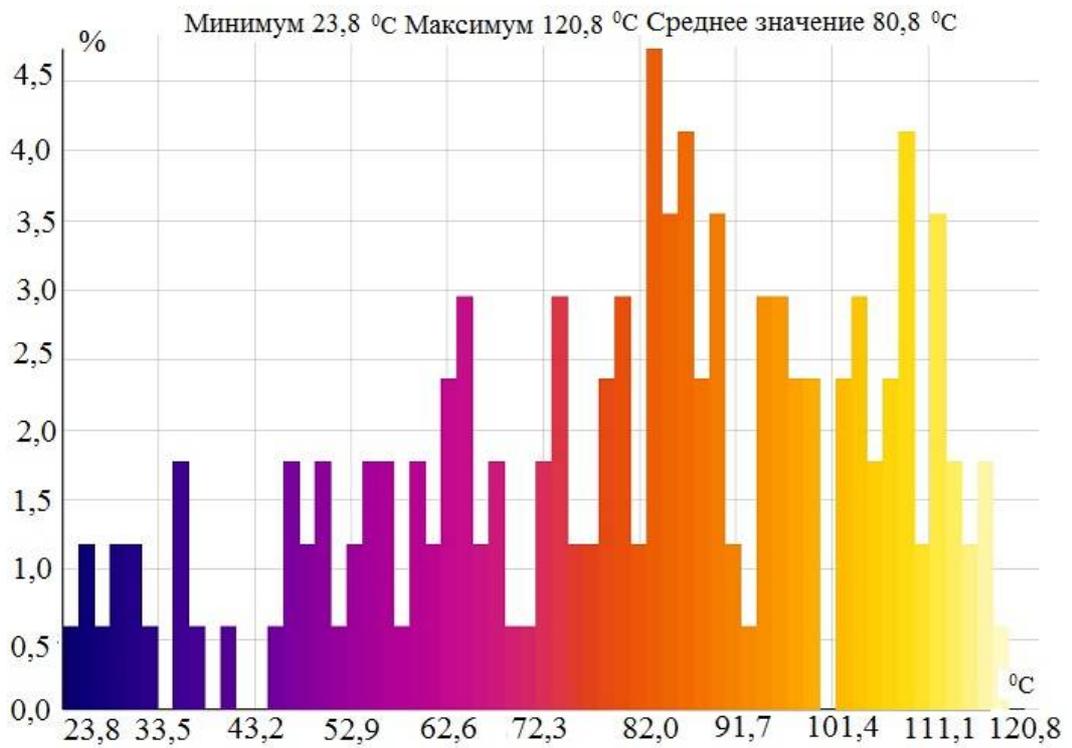
a*б*

Рис. 2.19. Тепловое поле при фрезеровании баббита Б83: *a* – термограмма, *б* – температурный профиль заготовки

Свинцовый баббит (рис. 2.18) имеет меньшую температуру, так как значительная часть тепла отводится со стружкой. При фрезеровании оловянного баббита (рис. 2.19), обладающего большей теплоемкостью, температура имеет большие значения, так как концентрируется в зоне резания.

Общей особенностью фрезерования баббитов в связи с их высокой теплопроводностью является то, что значительная часть тепла уходит в тело заготовки. На рисунке 2.19 отчетливо виден температурный «след» прохождения фрезы по заготовке.

Построим термограммы фрезерования баббита (баббит Б83, опыт №11) в различные моменты времени обработки с целью анализа распределения теплового поля в обрабатываемой заготовке и инструменте.

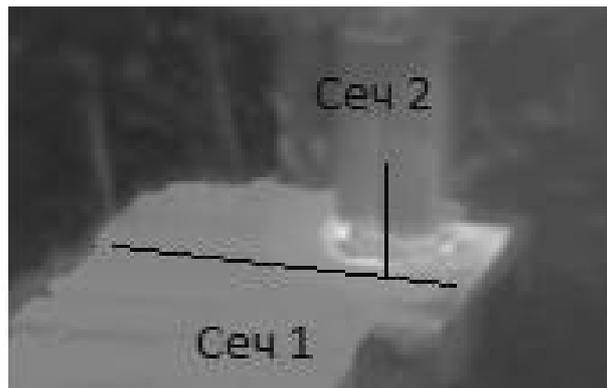


Рис. 2.20, а. Термограмма фрезерования баббита (5 секунд обработки)

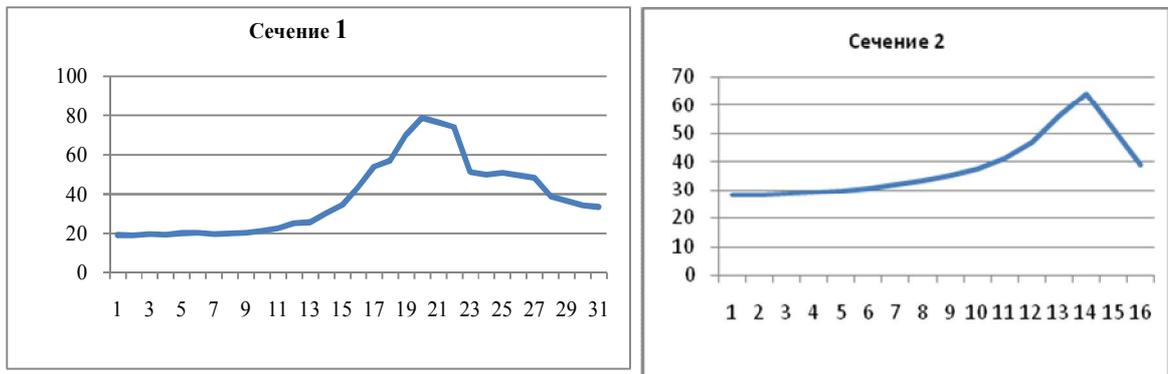


Рис. 2.20, б. Значения температуры в характерных сечениях (5 секунд обработки): сечение 1 – обрабатываемая деталь; сечение 2 – фреза

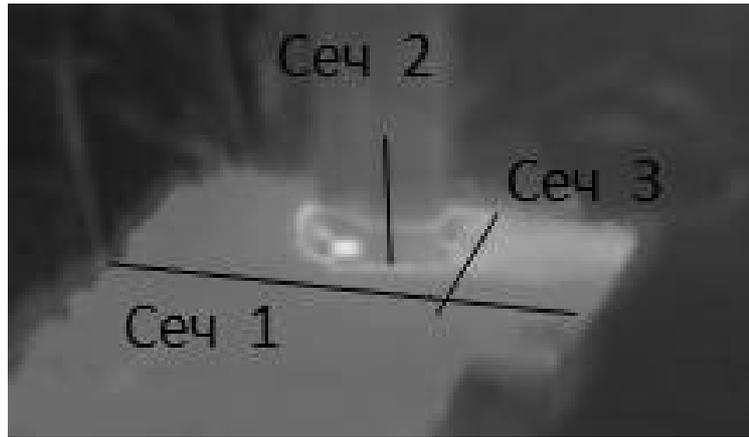


Рис. 2.21 Термограмма фрезерования баббита (20 секунд обработки)

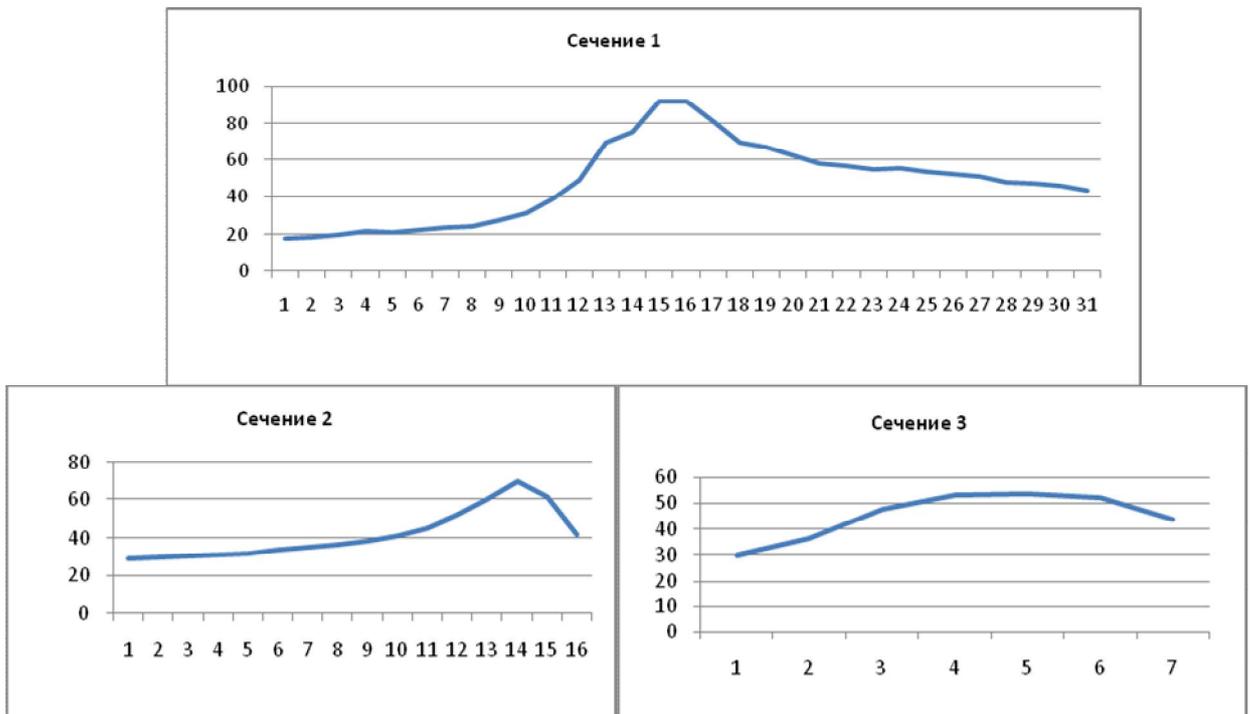


Рис. 2.22 Значения температуры в характерных сечениях (20 секунд обработки): сечение 1 – обрабатываемая деталь; сечение 2 – фреза; сечение 3 – обрабатываемая деталь

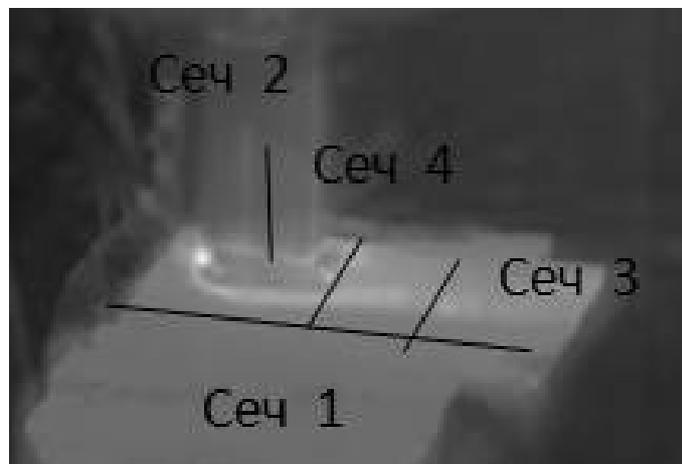


Рис. 2.23 Термограмма фрезерования баббита (30 секунд обработки)

На термограммах рис. 2.20, рис. 2.22 и рис. 2.24 отчетливо виден тепловой фронт, движущийся с обрабатываемым инструментом. В связи с тем, что баббит имеет достаточно высокую теплопроводность, тепловое поле достаточно быстро распространяется в тело детали, не имеет четко выраженных границ и несколько опережает движущийся инструмент.

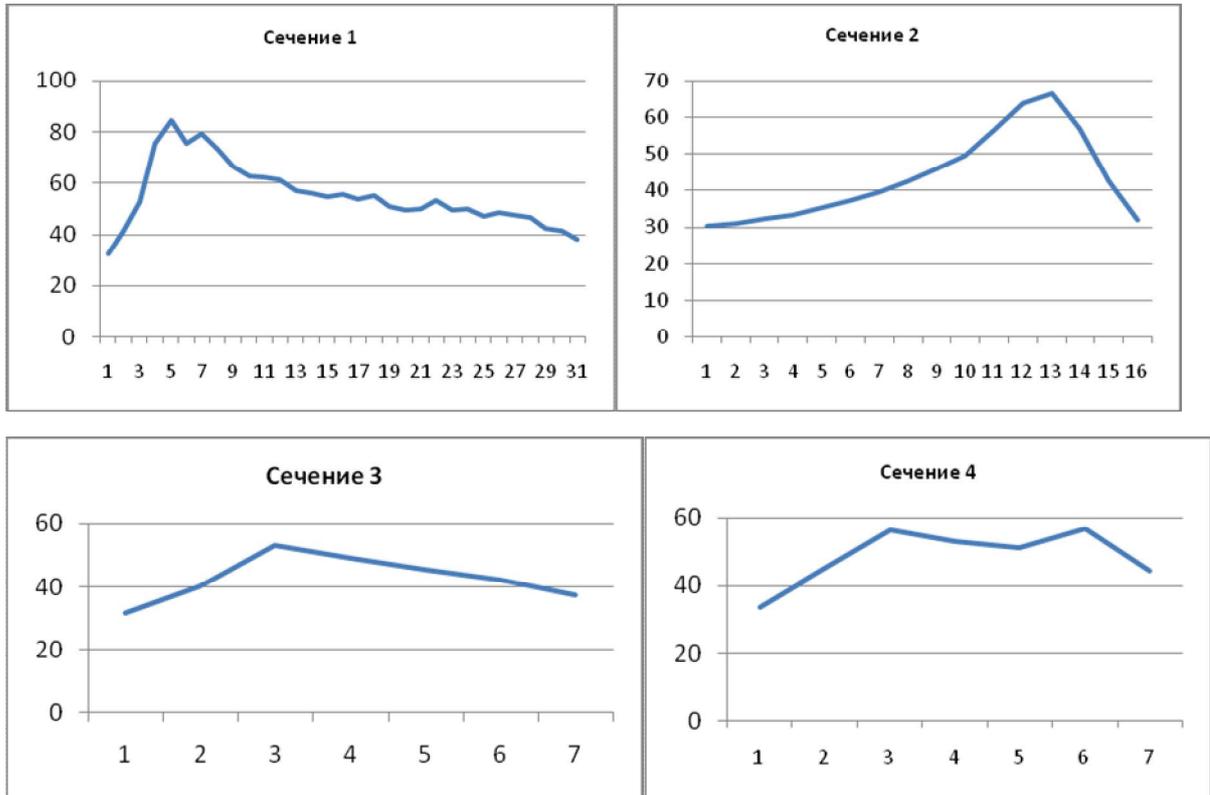


Рис. 2.24 Значения температуры в характерных сечениях (30 секунд обработки): сечение 1 – обрабатываемая деталь; сечение 2 – фреза; сечение 3,4 – обрабатываемая деталь

В начале обработки (рис. 2.23) температура резания составляет около 80°C , а максимальная температура режущего инструмента – 60°C . Большая часть детали имеет начальную температуру – около 20°C , обработанная поверхность – около 40°C . Через 20 секунд обработки температура резания стабилизируется и достигает 94°C , максимальная температура режущего инструмента увеличивается до 65°C . Тепловое поле расширяется, температура обработанной поверхности достигает 60°C . В конце обработки (через 30 секунд) все температурные значения стабилизируются, достигнув пиковых значений.

2.4. Разработка эмпирических моделей шероховатости поверхности при фрезеровании баббитов на оловянной и свинцовой основе

Целью исследования является выявление зависимости получаемой шероховатости при фрезеровании баббитов от используемых технологических параметров.

Используем самые часто применяемые марки баббитов Б16 - свинцовый и Б83- оловянный в качестве исследуемых. Проведем эксперимент на консольно-фрезерном станке 6Т82Ш. Производить обработку баббита будем четырехзубой торцовой фрезой диаметром 40 мм.

Для измерения полученной шероховатости использовался контрольно-измерительный прибор TIME TR100 (рис. 2.24). Данный прибор разработан TIME Grup Inc., обладает высокой точностью измерения, используется в широком диапазоне, а также очень прост в эксплуатации.

Основные технические характеристики профилометра TR100:



Рис. 2.24.

Профилометр TR100

- параметры измерения (мкм): Ra, Rz;
- длина перемещения (мм): 6;
- выборочная длина (мм): 0,25, 0,80, 2,5;
- оценочная длина (мм): 1,25, 4,0, 5,0;
- диапазон измерения (мкм): Ra: 0,05–10,0, Rz: 0,1–50;
- погрешность показаний: $\pm 7\%$;
- радиус и угол контактной точки щупа: радиус: $10,0 \pm 2,5$ мкм, угол: $90^\circ (+5^\circ, -10^\circ)$;
- стационарная сила измерения: $\leq 0,016$ Н;
- изменение измеряющей силы: ≤ 800 Н/м;
- давление на датчик: $\leq 0,5$ Н;

Действие прибора основано на принципе ошупывания неровностей исследуемой поверхности алмазной иглой щупа. Для калибровки прибора использовался стандартный блок, входящий в комплект прибора.

Исследуем следующие технологических параметры при фрезеровании баббитов: подачу режущего инструмента, глубину резания и скорость резания. Технологические параметры выбирались по следующим принципам: глубина резания определяет силовую составляющую процесса резания, от глубины резания зависят такие факторы как вибрация, отжатие технологической системы, что влияет на шероховатость, подача режущего инструмента оказывает самое значительное влияние на получаемую шероховатость, скорость резания во многом определяет температуру в зоне резания, деформационные и силовые характеристики процесса резания, чем также существенно определяет шероховатость обработанной поверхности [54].

Решение данной задачи потребовало проведения математического планирования эксперимента. Выбор уровней интервалов варьирования и факторов соответствовал значениям черновых, полу- и чистовых режимов. Факторы и интервалы варьирования приведены в табл. 2.13.

Центральный композиционный план второго порядка для трехфакторного эксперимента состоит из плана полного факторного эксперимента типа 2^3 (табл. 2.14, опыты № 1-8), 6-ти опытов в «звездных точках» (опыты № 9-14) и 6-ти опытов в центре плана (опыты № 15-20). Матрица планирования и результаты опытов приведены в табл. 2.14.

Таблица 2.13

Уровни и интервалы планирования факторов

№	Факторы	Кодовое обозначение	Интервалы варьирования	Натуральные уровни факторов, соответствующие кодированным				
				+1,682	+1	0	-1	-1,682
1	V , м/мин	x_1	35	160	140	105	70	50
2	S , мм/об	x_2	0.1	0,37	0,3	0,2	0,1	0,03
3	t , мм	x_3	0.75	2,75	2,25	1,5	0,75	0,3

Таблица 2.14

Матрица планирования и результаты опытов

№	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	x_1^2	x_2^2	x_3^2	y , Ra(мкм) Б16	y , Ra(мкм) Б83
1	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	10	11,7
2	+	+	+	-	+	-	-	+	+	+	9,5	11,3
3	+	+	-	+	-	+	-	+	+	+	1,9	2,3
4	+	+	-	-	+	-	+	+	+	+	2,1	2,4
5	+	-	+	+	-	-	+	+	+	+	8,3	9,3
6	+	-	+	-	-	+	-	+	+	+	9,04	10,4
7	+	-	-	+	+	-	-	+	+	+	1,7	1,9
8	+	-	-	-	+	+	+	+	+	+	2,0	2,5
9	+	1,682	0	0	0	0	0	2,829	0	0	4,9	5,9
10	+	-1,682	0	0	0	0	0	2,829	0	0	5,8	6,9
11	+	0	1,682	0	0	0	0	0	2,829	0	9,1	10,2
12	+	0	-1,682	0	0	0	0	0	2,829	0	1,3	1,7
13	+	0	0	1,682	0	0	0	0	0	2,829	7,1	8,3
14	+	0	0	-1,682	0	0	0	0	0	2,829	6,4	7,6
15	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4,0	4,8
16	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4,1	4,9
17	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4,0	4,8
18	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4,1	4,9
19	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4,0	4,8
20	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4,1	4,9

Коэффициенты уравнения регрессии оцениваются по результатам опытов, которые были проведены в соответствии с выбранным планом эксперимента:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 \quad 2.25$$

Формулы для вычисления коэффициентов уравнения регрессии имеют вид:

$$b_0 = 0,1666 \sum_{j=1}^{20} y_i - 0,05694 \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^{20} x_{ij}^2 y_i \quad 2.26$$

$$b_i = 0,07322 \sum_{j=1}^{20} x_{ij} y_j ; b_{il} = 0,125 \sum_{j=1}^{20} x_{ij} x_{lj} y_j \quad 2.27$$

$$b_{ij} = 0,06254 \sum_{j=1}^{20} x_{ij}^2 y_j + 0,0695 \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^{20} x_{ij}^2 y_i - 0,05694 \sum_{j=1}^{20} y_j \quad 2.28$$

В результате расчетов были получены значения коэффициентов для каждого из материалов, представленные в табл. 2.15.

Таблица 2.15

Значения коэффициентов уравнения регрессии.

Коэф Материал	b_0	b_1	b_2	b_3	b_{12}	b_{13}	b_{23}	b_{11}	b_{22}	b_{33}
Б16	4,195	0,069	3,094	-0,044	0,233	0,042	-0,092	0,381	0,328	0,726
Б83	5,022	0,14	3,507	-0,019	0,375	0,25	0	0,445	0,285	0,815

После подстановки значений коэффициентов уравнение (2.25) для баббита Б16 принимает вид:

$$y = 4,195 + 0,069x_1 + 3,094x_2 - 0,044x_3 + 0,233x_1x_2 + 0,042x_1x_3 - 0,092x_2x_3 + 0,381x_1^2 + 0,328x_2^2 + 0,726x_3^2$$

для баббита Б83:

$$y = 5,022 + 0,14x_1 + 3,507x_2 - 0,019x_3 + 0,375x_1x_2 + 0,25x_1x_3 + 0,445x_1^2 + 0,285x_2^2 + 0,815x_3^2$$

Проверка полученного уравнения и расчет дисперсии коэффициентов основывается на дисперсии s_y^2 воспроизводимости эксперимента, который вычисляется из 6-ти опытов в центре плана (опыты № 15-20, табл. 2.14).

Рассчитаем среднее арифметическое значение параметра оптимизации \bar{y} в центре плана:

$$\text{для Б16: } \bar{y} = \frac{1}{n_0} \sum_{n-1}^{n_0=6} y_u = 4,05 \quad 2.29$$

$$\text{для Б83: } \bar{y} = \frac{1}{n_0} \sum_{n-1}^{n_0=6} y_u = 4,85$$

Таблица 2.16

Результаты опытов в центре плана и в «звездных» точках

Содержание плана	№ оп.	x_1	x_2	x_3	v , М/МИН	s , ММ/ОБ	t , ММ	Ra B16, МКМ	Ra B83, МКМ
Опыты в центре плана	1	0	0	0	105	0,2	1,5	4,0	4,8
	2	0	0	0	105	0,2	1,5	4,1	4,9
	3	0	0	0	105	0,2	1,5	4,0	4,8
	4	0	0	0	105	0,2	1,5	4,1	4,9
	5	0	0	0	105	0,2	1,5	4,0	4,8
	6	0	0	0	105	0,2	1,5	4,1	4,9
Опыты в «звездных» точках	7	1,682	0	0	160	0,2	1,5	4,9	5,9
	8	-1,682	0	0	50	0,2	1,5	5,8	6,9
	9	0	1,682	0	105	0,37	1,5	9,1	10,2
	10	0	-1,682	0	105	0,03	1,5	1,3	1,7
	11	0	0	1,682	105	0,2	2,75	7,1	8,3
	12	0	0	-1,682	105	0,2	0,3	6,4	7,6

Дисперсия s_y^2 воспроизводимости эксперимента рассчитывается по формуле:

$$s_y^2 = \frac{1}{n_0 - 1} \sum_{u=1}^{n_0=6} (y_u - \bar{y})^2 \quad 2.30$$

$$\text{для B16: } s_y^2 = 0,03$$

$$\text{для B83: } s_y^2 = 0,03$$

Дисперсии, характеризующие ошибки в определении коэффициентов уравнения регрессии вычисляем по формулам, которые при $k = 3$ примут вид:

$$s^2 \{b_0\} = 0,16666 s_y^2 = 5 \times 10^{-4} \quad 2.31$$

$$s^2 \{b_i\} = 0,07322 s_y^2 = 2,197 \times 10^{-4} \quad 2.32$$

$$s^2 \{b_{ii}\} = 0,125 s_y^2 = 3,75 \cdot 10^{-4} \quad 2.33$$

$$s^2 \{b_{ij}\} = 0,0695 s_y^2 = 2,085 \cdot 10^{-4} \quad 2.34$$

Рассчитаем доверительные интервалы для коэффициентов:

$$\Delta b_0 = \pm t s \{b_0\} = 0,057 ; \Delta b_i = \pm t s \{b_i\} = 0,038 \quad 2.35$$

$$\Delta b_{il} = \pm ts \{b_{il}\} = 0,05; \Delta b_{lj} = \pm ts \{b_{lj}\} = 0,037 \quad 2.36$$

где $t=2,57$ – табличное значение критерия Стьюдента при 5%-ном уровне значимости и числе степеней свободы $f=5$.

Находим коэффициенты, чьи значения меньше доверительных интервалов. Для баббита Б16 это коэффициент b_{13} , а для баббита Б83 это коэффициенты b_3 и b_{23} . Признаем их статистически незначимыми и исключим из уравнений регрессии, которые после исключения будут иметь вид:

для Б16:

$$y = 4,195 + 0,069x_1 + 3,094x_2 - 0,044x_3 + 0,233x_1x_2 - 0,092x_2x_3 + 0,381x_1^2 + 0,328x_2^2 + 0,726x_3^2$$

для Б83:

$$y = 5,022 + 0,14x_1 + 3,507x_2 + 0,375x_1x_2 + 0,25x_1x_3 + 0,445x_1^2 + 0,285x_2^2 + 0,815x_3^2$$

Проверка гипотезы адекватности модели показала, что модели адекватны при 5%-ном уровне значимости, так как расчетное значение F-критерия меньше табличного. Вычисленные по уравнению регрессии значения y отличаются от экспериментальных на величины, не превышающие ошибку опыта.

$$F_p = \frac{S_{ad}^2}{s_y^2} \quad 2.37$$

$$\text{для Б16 } F_p = 4,204; \text{ для Б83 } F_p = 4,2$$

При 5%-ном уровне значимости и числах степеней свободы для числителя 10 и знаменателя 5 табличное значение критерия равно 4,74. Значение $F_p < F_T$, поэтому обе модели следует признать адекватными.

Полученные уравнения неудобны для интерпретации полученных результатов и практических расчетов, поэтому преобразуем их по формулам перехода от кодированных значений (x_1, x_2, x_3) к натуральным значениям факторов (s, v, t) :

$$x_1 = \frac{v-105}{35}; x_2 = \frac{s-0,1}{0,2}; x_3 = \frac{t-1,5}{0,75} \quad 2.38$$

Уравнения зависимости шероховатости от технологических параметров:

Для баббита Б16:

$$Ra(s, v, t) = 4,195 + 0,069 \cdot \frac{v-105}{35} + 3,094 \cdot \frac{s-0,1}{0,2} - 0,044 \cdot \frac{t-1,5}{0,75} + 0,233 \cdot \frac{v-105}{35} \cdot \frac{s-0,1}{0,2} - 0,092 \cdot \frac{s-0,1}{0,2} \cdot \frac{t-1,5}{0,75} + 0,381 \left(\frac{v-105}{35} \right)^2 + 0,328 \cdot \left(\frac{s-0,1}{0,2} \right)^2 + 0,726 \cdot \left(\frac{t-1,5}{0,75} \right)^2$$

После упрощения уравнение принимает вид:

$$Ra(s, v, t) = 8,35 - 6,7 \cdot 10^{-3} v + 11,26s - 3,8t + 3,33 \cdot 10^{-2} vs - 6,1 \cdot 10^{-1} st + 3 \cdot 10^{-4} v^2 + 8,2s^2 + 1,3t^2$$

Для баббита Б83:

$$Ra(s, v, t) = 5,022 + 0,014 \cdot \frac{v-105}{35} + 3,507 \cdot \frac{s-0,1}{0,2} + 0,375 \cdot \frac{v-105}{35} \cdot \frac{s-0,1}{0,2} + 0,25 \cdot \frac{v-105}{35} \cdot \frac{t-1,5}{0,75} + 0,445 \left(\frac{v-105}{35} \right)^2 + 0,285 \cdot \left(\frac{s-0,1}{0,2} \right)^2 + 0,815 \cdot \left(\frac{t-1,5}{0,75} \right)^2$$

После упрощения уравнение принимает вид:

$$Ra(s, v, t) = 12,625 - 7,8 \cdot 10^{-1} v + 10,5s - 5,3t + 5,4 \cdot 10^{-2} vs - 9,5 \cdot 10^{-3} vt + 3,8 \cdot 10^{-4} v^2 + 7,1s^2 + 1,4t^2$$

Полученные уравнения зависимости шероховатости поверхности от технологических параметров адекватны и в полной мере могут быть использованы для определения шероховатости при фрезеровании.

Рассмотрим влияние технологических параметров на получаемую шероховатость обработанной поверхности при фрезеровании баббита Б16. На рис. 2.25 – 2.27 представлено влияние скорости, подачи и глубины резания на шероховатость поверхности. Горизонтальными линиями обозначена необходимая шероховатость при черновом и чистовом фрезеровании.

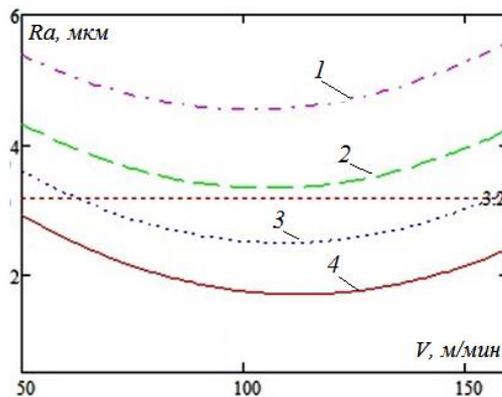


Рис. 2.25, а. Зависимость шероховатости от скорости резания при постоянной глубине резания 1 мм: 1) $Sz=0,2$ мм/зуб; 2) $Sz=0,16$ мм/зуб; 3) $Sz=0,13$ мм/зуб; 4) $Sz=0,1$ мм/зуб;

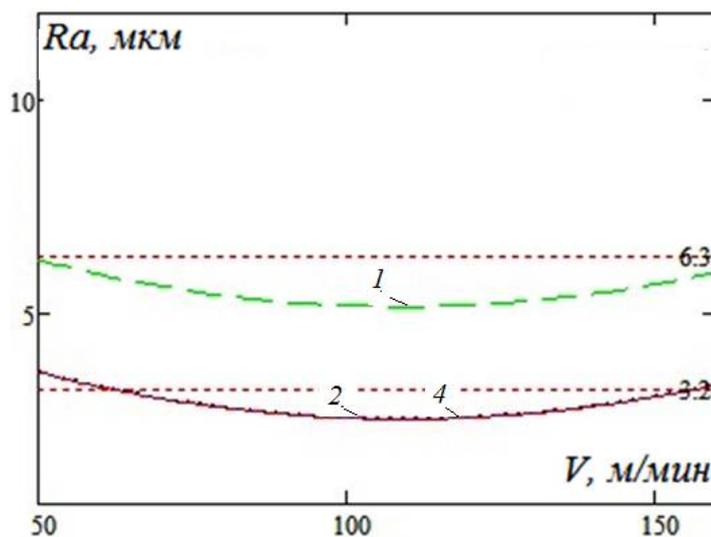


Рис. 2.25б. Зависимость шероховатости от скорости резания при постоянной подаче 0,13 мм/зуб: 1) $t = 3$ мм; 2) $t = 2$ мм; 3) $t = 1$ мм

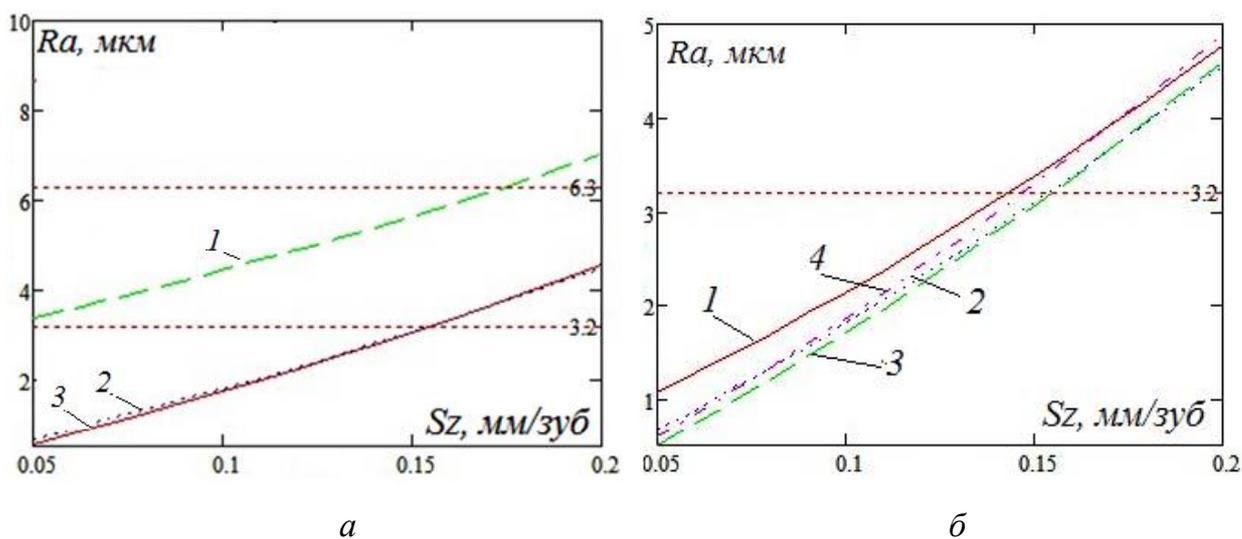


Рис. 2.26. Зависимость шероховатости от подачи:
 а) $V = 105$ м/мин: 1) $t = 3$ мм; 2) $t = 2$ мм; 3) $t = 1$ мм;
 б) $t = 1$ мм: 1) $V = 75$ м/мин; 2) $V = 95$ м/мин; 3) $V = 115$ м/мин; 4) $V = 135$ м/мин

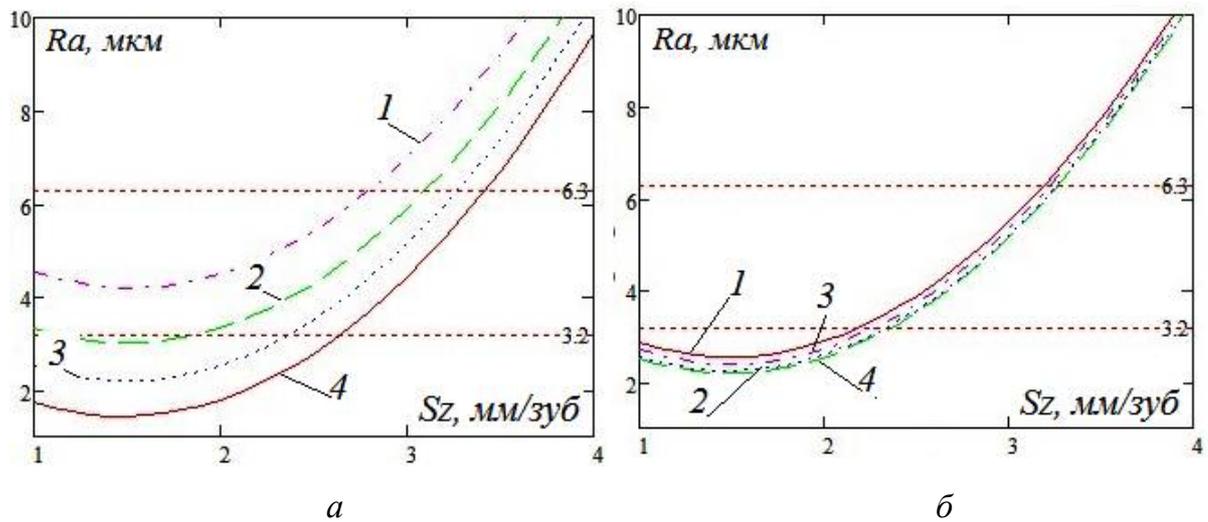


Рис. 2.27. Зависимость шероховатости от подачи:

а) $V = 105$ м/мин: 1) $Sz = 0,2$ мм/зуб; 2) $Sz = 0,16$ мм/зуб;

3) $Sz = 0,13$ мм/зуб; 4) $Sz = 0,1$ мм/зуб;

б) $Sz = 0,13$ мм/зуб: 1) $V = 75$ м/мин; 2) $V = 95$ м/мин;

3) $V = 115$ м/мин; 4) $V = 135$ м/мин

Анализ графиков на рис. 2.25-2.27 позволил сделать следующие выводы. Получена линейная зависимость шероховатости обработанной поверхности от подачи, что не противоречит общепринятым теоретическим положениям.

При фрезеровании баббита марки Б16 скорость резания не будет иметь значительного влияния на получаемую шероховатость в диапазоне 50-150 м/мин. С увеличением глубины резания значения шероховатости увеличиваются, зависимость имеет ярко выраженный экстремум, в интервале $t = 1-2$ мм шероховатость минимальна. Увеличение скорости резания не изменяет существенно характер влияния подачи и глубины резания, но снижает значение шероховатости при значении 110 м/мин, более явно данное влияние проявляется при меньших значениях подач.

Рассмотрим зависимость шероховатости поверхности при фрезеровании баббита Б83 от технологических параметров рис. 2.28-2.30.

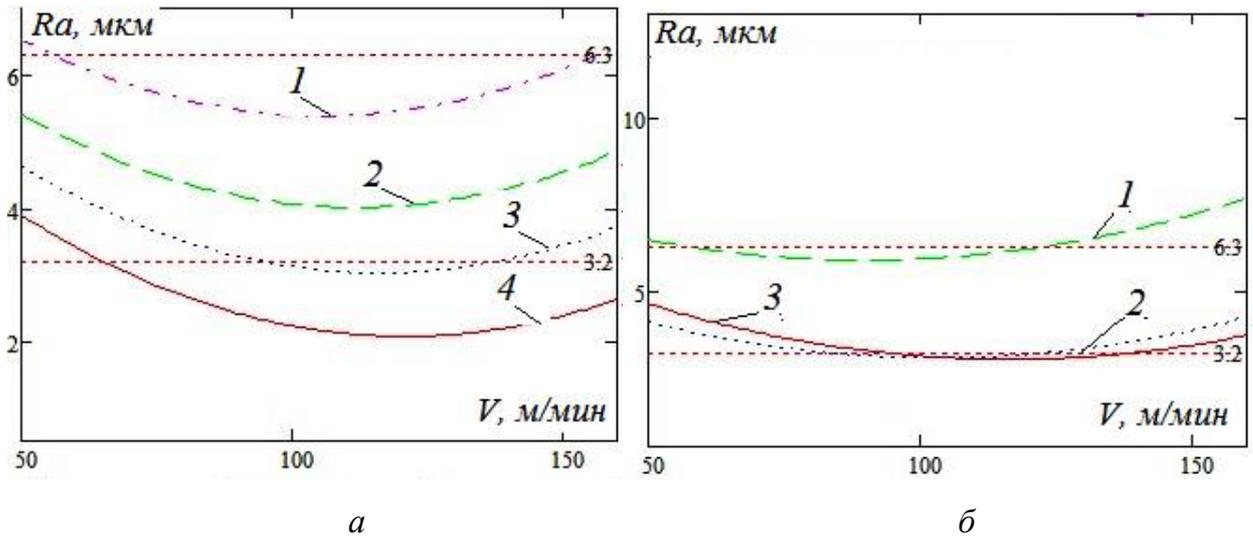


Рис. 2.28. Зависимость шероховатости поверхности от скорости резания:

а) $t = 1$ мм: 1) $Sz = 0,2$ мм/зуб; 2) $Sz = 0,16$ мм/зуб;

3) $Sz = 0,13$ мм/зуб; 4) $Sz = 0,1$ мм/зуб;

б) $Sz = 0,13$ мм/зуб: 1) $t = 3$ мм; 2) $t = 2$ мм; 3) $t = 1$ мм

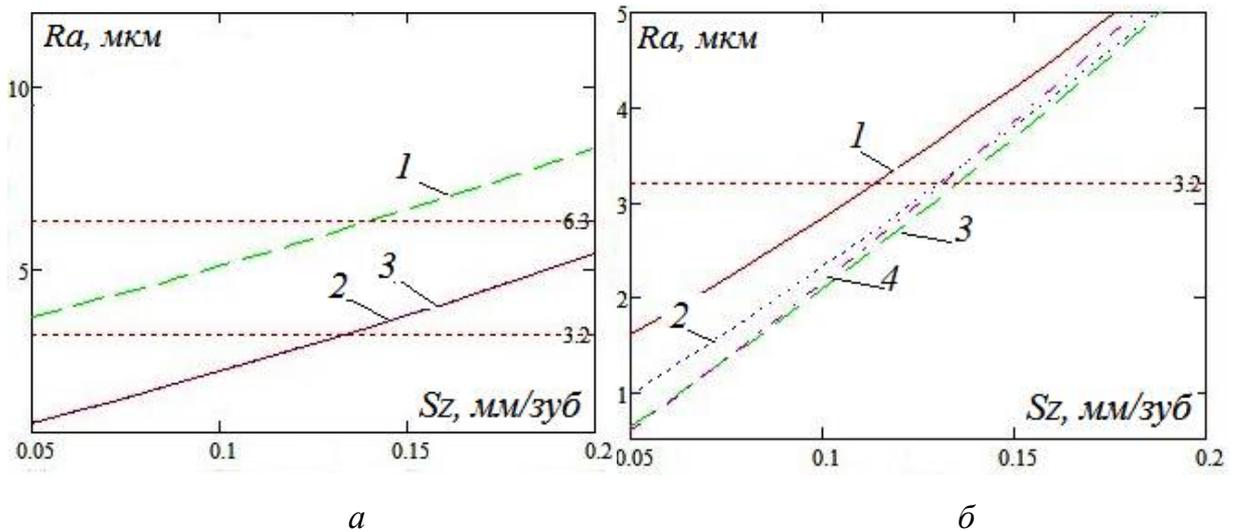


Рис. 2.29. Зависимость шероховатости от подачи:

а) $V = 105$ м/мин: 1) $t = 3$ мм; 2) $t = 2$ мм; 3) $t = 1$ мм;

б) $t = 1$ мм: 1) $V = 75$ м/мин; 2) $V = 95$ м/мин; 3) $V = 115$ м/мин; 4) $V = 135$ м/мин

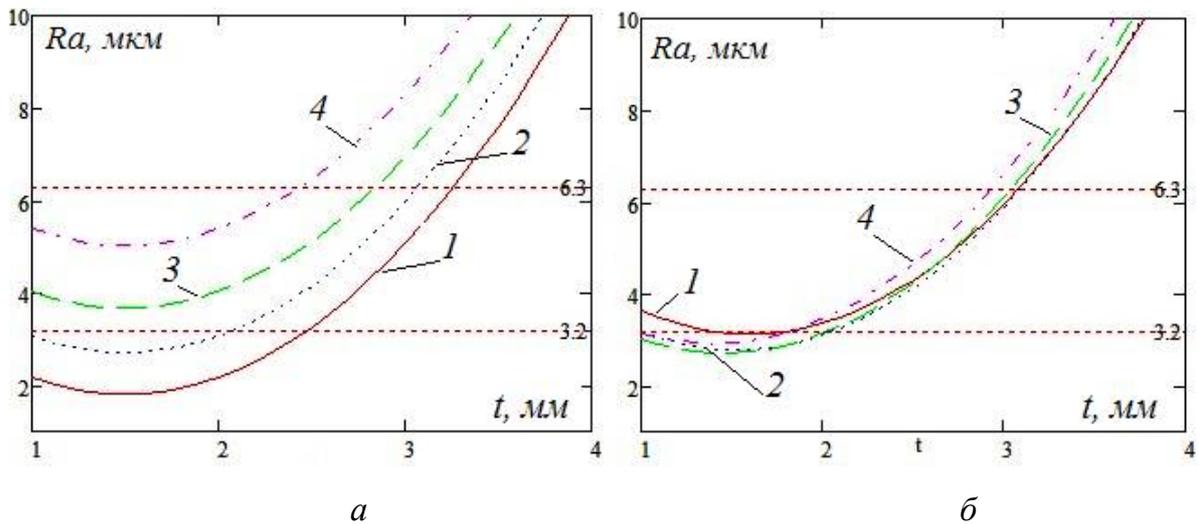


Рис. 2.30. Зависимость шероховатости от глубины резания:

a) $t = 1$ мм: 1) $S_z = 0,1$ мм/зуб; 2) $S_z = 0,13$ мм/зуб;

3) $S_z = 0,16$ мм/зуб; 4) $S_z = 0,2$ мм/зуб;

б) $S_z = 0,13$ мм/зуб: 1) $V = 75$ м/мин; 2) $V = 95$ м/мин;

3) $V = 115$ м/мин; 4) $V = 135$ м/мин

Анализ графиков рис. 2.28 – 2.30 показал следующие результаты. Влияние подачи на шероховатость поверхности аналогично фрезерованию баббита Б16, зависимость близка к линейному виду. Скорость резания также не имеет значительного влияния на получаемую шероховатость в диапазоне 50-150 м/мин при малой глубине резания. Экстремум снижения шероховатости несколько смещен в сторону больших скоростей и составляет около 125 м/мин. С увеличением глубины резания характер влияния скорости меняется и значения шероховатости увеличиваются при скоростях свыше 100 м/мин. Влияние глубины резания как и для баббита Б16 имеет экстремум при малой глубине $t = 1-2$ мм, с увеличением глубины резания шероховатость резко возрастает.

Полученные эмпирические модели шероховатости поверхности баббитов, обработанных фрезерованием дают возможность назначать технологические режимы обработки, прогнозировать качество обработанной поверхности, а также оптимизировать технологические параметры.

2.5. Результаты и выводы

1. В соответствии с обеспечиваемыми параметрами качества обрабатываемой поверхности обоснована целесообразность применения фрезерования в качестве метода механической обработки, альтернативного традиционно применяемому ручному шабрению.

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

3. Выявлены 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.

4. По результатам экспериментальных исследований установлены зависимости тангенциальной составляющей силы резания и температуры резания от технологических параметров (глубины резания, подачи на зуб, ширины фрезерования, частоты вращения и диаметра фрезы) при фрезеровании баббита.

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

ГЛАВА 3. ПРОЕКТИРОВАНИЕ СТАНОЧНОГО МОДУЛЯ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ОПОРНОЙ ПОВЕРХНОСТИ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ПОДШИПНИКОВ

Традиционно при ремонте поверхности скольжения крупногабаритных подшипников используется в качестве основного метода обработки – ручное шабрение, которое имеет ряд существенных недостатков: высокая трудоемкость процесса, качество обработки напрямую зависит от квалификации исполнителя. При этом к качеству данной поверхности предъявляют ряд жестких требований по точности геометрической формы и микрорельефу поверхности, так как качество поверхности скольжения обуславливает работоспособность подшипника в процессе эксплуатации, влияя на процессы износа.

Вследствие низкой производительности и точности ручного труда предлагается изменить базовую технологию ремонта внутренней поверхности, заменив ручное шабрение механической обработкой – фрезерованием.

Для реализации процесса фрезерования необходимо спроектировать специальное оборудование, которое должно отвечать ряду требований:

- обеспечивать требуемое положение обрабатывающего инструмента с заданной точностью относительно обрабатываемой поверхности;
- обеспечивать кинематические взаимосвязанные рабочие движения обрабатывающего инструмента: главное движение и движения подачи;
- технологические параметры обработки должны лежать в заданных интервалах, обеспечивая требуемое качество обрабатываемой поверхности.

Для выполнения указанных требований необходимо разработать структуру исполнительного механизма, провести его кинематический анализ, также анализ обеспечения заданной точности.

3.1. Разработка структурной и кинематической схемы исполнительного механизма

Для выполнения процесса механической обработки фрезерованием необходимо обеспечить ряд кинематических взаимосвязанных движений:

- главное движение обрабатывающего инструмента;
- продольную подачу обрабатывающего инструмента;
- поперечную подачу обрабатывающего инструмента.

Конструкция оборудования, проектируемого для обработки антифрикционной поверхности крупногабаритных подшипников, должна обеспечивать указанные кинематические движения с учетом технологических параметров, разработанных во 2 главе [93, 94].

Главным движением является вращение фрезы вокруг собственной оси. Данное движение может быть достаточно просто реализовано с использованием в качестве привода асинхронного электродвигателя [1].

Продольная подача – это заданное перемещение инструмента вдоль обрабатываемой поверхности. Традиционно считается что продольная подача осуществляется прямолинейно вдоль обрабатываемой заготовки, но при ремонтной обработке вкладышей крупногабаритного оборудования возникает необходимость продольной подачи, осуществляемой по радиусной поверхности.

При этом должна быть обеспечена технологически необходимая относительная скорость перемещения, согласованная с вращением инструмента [40].

Поперечная подача – это смещение вдоль образующей цилиндрической поверхности сегмента после выполнения одного рабочего прохода. Предполагается, что данное движение будет реализовано в автоматическом режиме при достижении инструментом точки начала рабочего хода. Поперечная подача будет производиться за пределами обрабатываемой поверхности во время подвода инструмента.

Наиболее сложной задачей является обеспечение движения продольной подачи. Предлагается реализовать его с использованием кривошипно-коромыслового механизма, состоящего из 4-х звеньев, схема которого представлена на рис.3.1 [9].

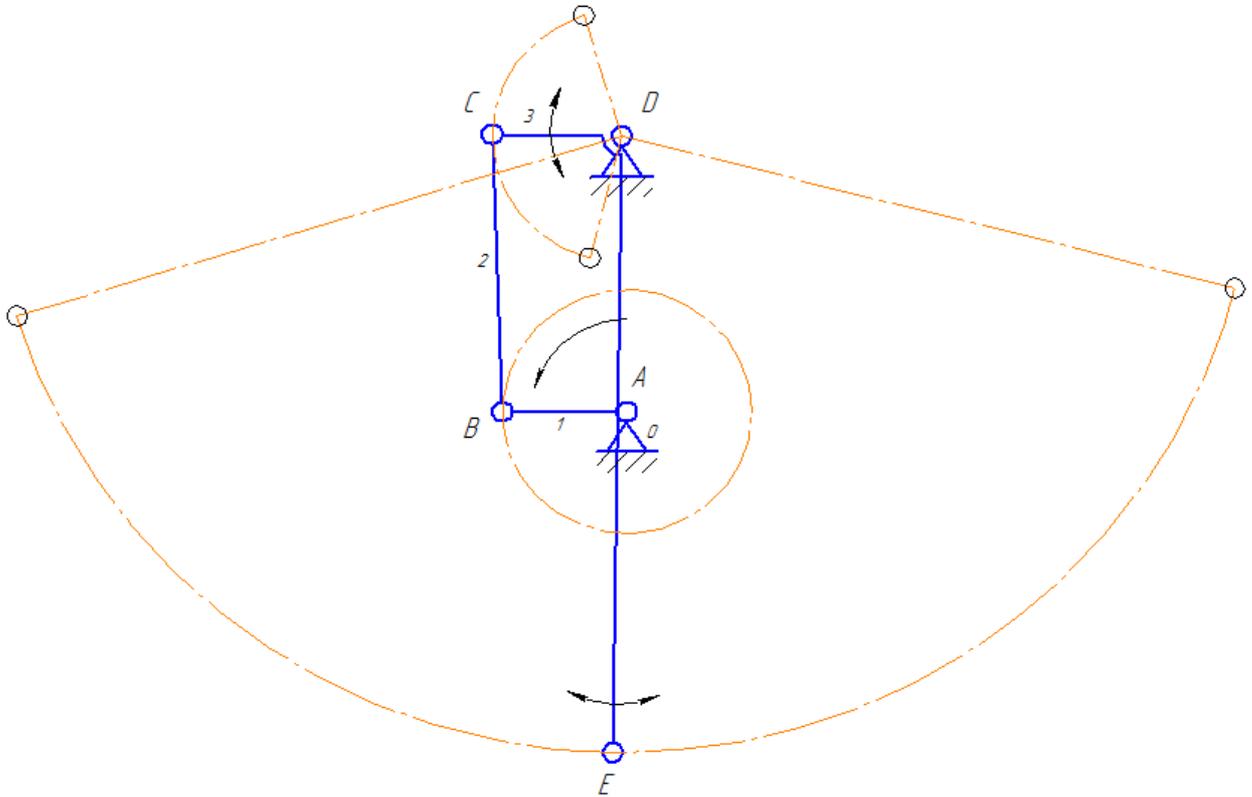


Рис. 3.1. Четырехзвенный шарнирный кривошипно-коромысловый механизм

Данный механизм состоит из четырех звеньев: стойка 0, кривошип 1, кулиса 2 и коромысло 3. Входным звеном является кривошип 1, выходным – стойка коромысла 3 с закрепленным на нем в точке *E* режущим инструментом.

Кривошипу сообщается вращательное движение через редуктор от электродвигателя. Согласно расчётам механизма его кулиса преобразует вращение кривошипа в возвратно-поступательные качания стойки коромысла DE, у которой точка *E* является режущим инструментом – фрезой или резцом. Длина звеньев механизма позволяет регулировать угол качания режущего инструмента. При совершении кривошипом одного полного оборота режущий инструмент (фреза, резец) совершает 1 цикл обработки –

холостой и рабочий ход. После чего инструменту необходимо придать движение поперечной подачи для выполнения обработки следующего участка.

Для поперечной подачи в качестве привода может быть использован шаговый двигатель, обеспечивающий перемещение инструмента на расстояние, равное ширине фрезерования.

Для обеспечения заданных технологических параметров в процессе выполнения механической обработки – требуемой скорости резания и величины продольной подачи необходимо выполнить структурный и кинематический анализ представленного исполнительного механизма. Необходимо также кинематически обеспечить врезание инструмента перед рабочим ходом и перебеги после его окончания. Кроме того, время выхода инструмента за пределы обработки должно быть достаточным для выполнения продольной подачи инструмента. Это обеспечивается подбором длин кривошипа, кулисы и коромысла, которые обеспечивают угол качания фрезы, больший угла сегмента на заданный угол [8, 10, 65].

Этапами структурного анализа механизма являются:

- определение числа кинематических пар и их классификация;
- определение числа степеней свободы механизма;
- выявление избыточных связей и местных степеней свободы;
- выделение групп звеньев в соответствии с принципом Ассура.

Информация о структуре и кинематических особенностях механизма, полученная из анализа, будет использована на следующих этапах изучения механизма, выявления особенностей взаимодействия его частей друг с другом для обеспечения требуемых кинематических соотношений с целью реализации заданных технологических параметров процесса резания [66].

Звенья четырехзвенного шарнирного кривошипно-коромыслового механизма образуют четыре кинематических пары: 0–1, 1–2, 0–3, 2–3 – вращательные, одноподвижные, пятого класса. Данный механизм является рычажным, так как все кинематические пары – низшие. Исследуемый

механизм является плоским [96], так как его звенья движутся в плоскостях, параллельных неподвижной плоскости. Механизм замкнутый, так как в его составе нет звеньев, образующих только одну кинематическую пару. Звенья механизма образуют один замкнутый контур: 0 – 1 – 2 – 3. Определим по формуле Чебышева число степеней свободы:

$$W = 3(n - 1) - 2p_H \quad 3.1$$

где n – число звеньев; p_H – число низших кинематических пар.

В рассматриваемом механизме $n=4$, $p_H=4$, поэтому $W = 3(4 - 1) - 2 \cdot 4 = 1$ - механизм обладает одной степенью свободы. Выявим избыточные связи: число избыточных связей, образованных при замыкании контуров, определим из соотношения

$$q = W_q - W_{CM} \quad 3.2$$

где W_q – число степеней свободы, найденное по формуле Чебышева; W_{CM} – число степеней свободы, найденное по формуле Сомова – Малышева:

$$W_{CM} = 6(n - 1) - \sum_{i=1}^5 ip_i \quad 3.3$$

где i – класс кинематических пар; p_i – число кинематических пар соответствующего класса.

В данном случае:

$$W_{CM} = 6(n - 1) - 4 \cdot p_5 = 6(4 - 1) - 5 \cdot 4 = -2 \text{ и } q = W_q - W_{CM} = 1 - (-2) = 3.$$

Таким образом, механизм имеет три контурных избыточных связи.

В соответствии с принципом Ассура, выделим начальный механизм, обладающий числом степеней свободы всего исследуемого механизма. Этот механизм – кривошипный, состоит из стойки 0 и кривошипа 1 (рис. 3.2а). Остальные звенья образуют ведомую цепь, имеющую нулевую подвижность относительно звеньев начального механизма (рис. 3.2б). Ведомая цепь, в свою очередь, состоит из одной двухзвенной структурной группы: 2 – 3.

Обозначим штриховой линией на рисунке 3.2 внешние кинематические пары – «поводки», этими парами звенья групп присоединяются к начальному механизму или звеньям соседних групп.

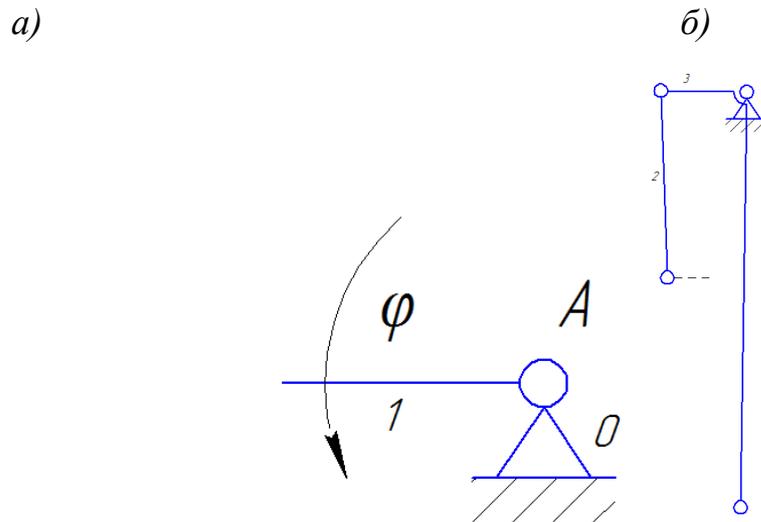


Рис. 3.2. Кинематическая схема четырехзвенного механизма:

a - начальный механизм $W_H = 1$; *б* - ведомая цепь $W_{ВЦ} = 0$

Построим план положений механизма (рис. 3.3). Нулевым будем считать крайнее правое положение механизма; траектория точки *B* кривошипа 1 будет отображаться на плане положений окружностью радиуса l_{AB} . Разделим окружность на двенадцать одинаковых секторов и построим кинематическую схему механизма в 12 двенадцати положениях. Положения механизма нумеруются в соответствии с направлением вращения кривошипа 1. Выполненный план положений механизма наглядно демонстрирует взаимные положения и перемещения звеньев в процессе работы механизма, позволяет найти крайние положения и диапазон перемещений выходного звена. План положений механизма позволяет построить график функции положения механизма, а также план скоростей и ускорений звеньев механизма и произвести силовой анализ механизма.

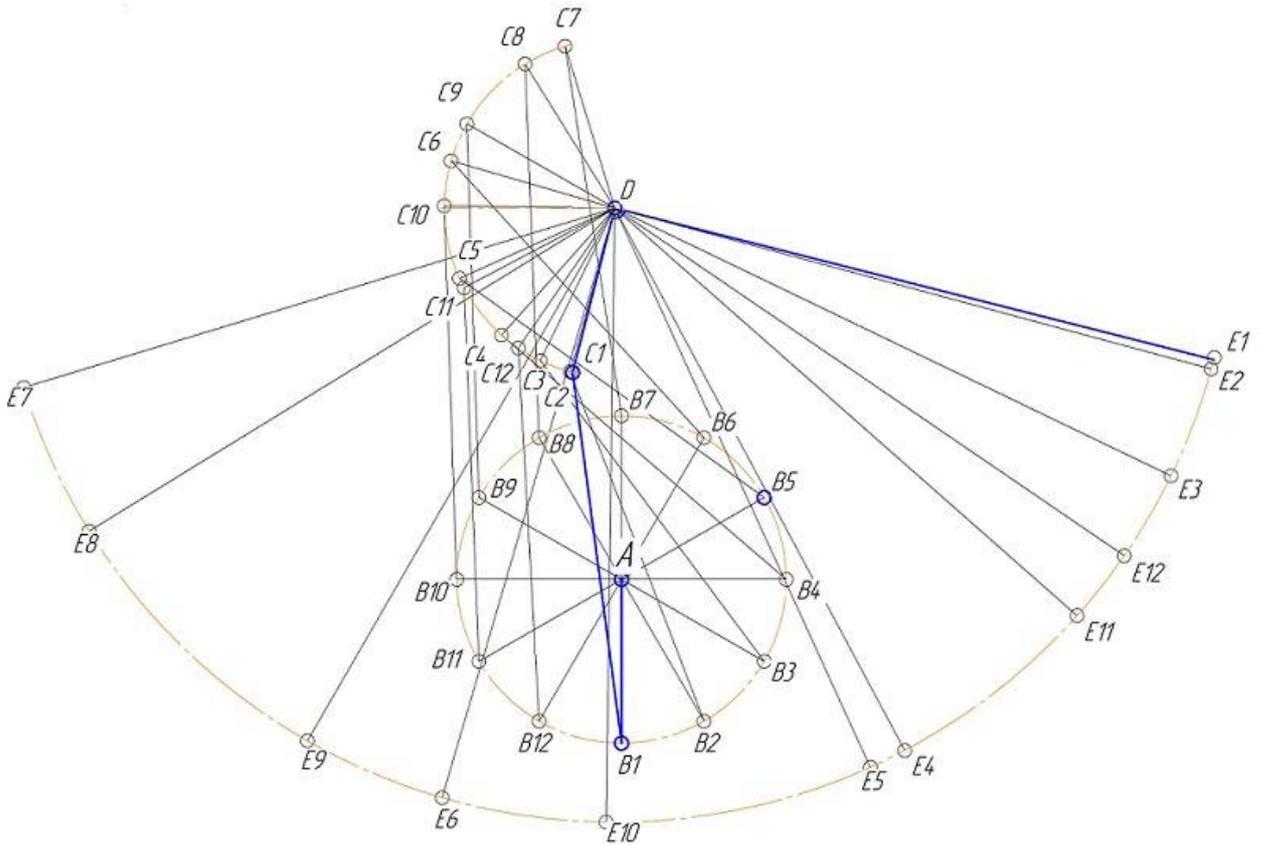


Рис. 3.3 План положений

С целью реализации возможности применения станка на подшипниках скольжения с различными размерами и различными марками баббита необходимо составить расчетную схему станка, которая будет показывать изменения выходных параметров от входных. Это означает возможность подбора режимов резания и угла качания рамы станка за счет изменения размеров звеньев механизма, угла при вершине коромысла и смещения оси коромысла.

Расчетная схема станка представлена на рис. 3.4. Входными параметрами для расчетов являются:

ω – угловая скорость вращения кривошипа O_1A (константа);

l_1, l_2, l_3, l_4 – длины кривошипа O_1A , связующего звена AB , плеч коромысла O_2B и O_2C , соответственно;

α – угол при вершине коромысла;

h – смещение оси коромысла O_2 относительно опоры O_1 по вертикали.

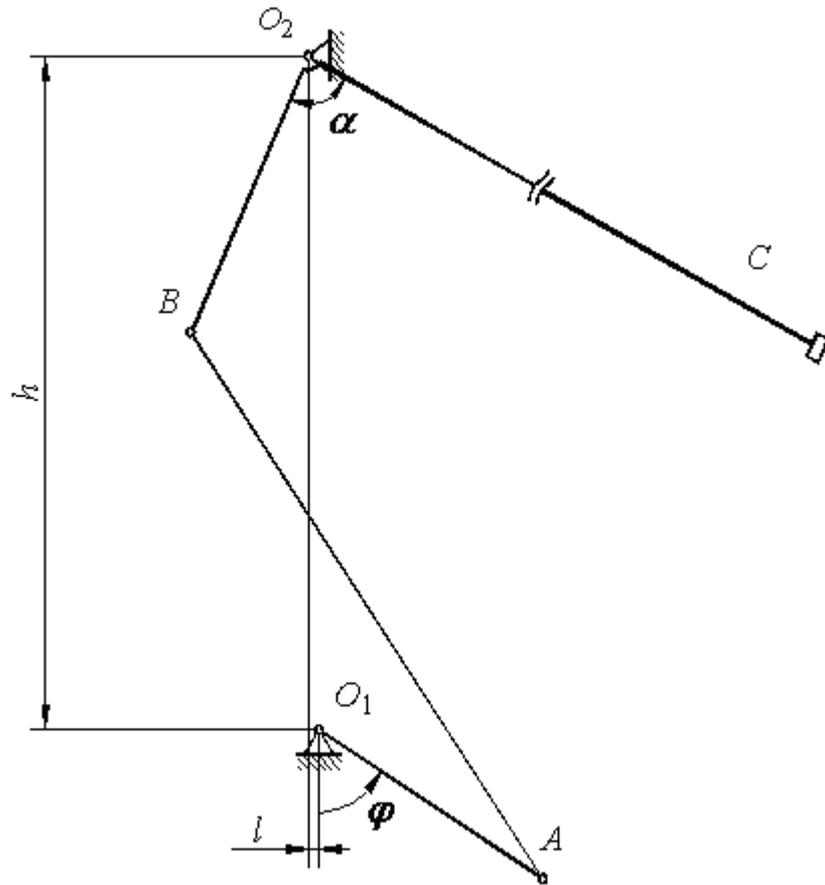


Рис. 3.4. Расчетная схема кривошипно-кулисного механизма

Точка O_2 будет являться началом системы координат (рис. 3.4). Тогда координаты опоры O_1 будут следующими:

$$\begin{cases} x_{O_1} = -l \\ y_{O_1} = -h, \end{cases} \quad 3.4$$

а шарнира A –

$$\begin{cases} x_A = l_1 \sin \varphi \\ y_A = -l_1 \cos \varphi - h, \end{cases} \quad 3.5$$

где

$$\varphi = \omega t \quad 3.6$$

Координаты шарнира B могут быть определены из условий, что он находится на расстоянии l_2 от шарнира A и на расстоянии l_3 от оси коромысла O_2 :

$$\begin{cases} x_B^2 + y_B^2 = l_3^2 \\ (x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2 = l_2^2. \end{cases} \quad 3.7$$

Полученная система уравнений имеет следующее решение:

$$\begin{cases} x_B = \frac{C_1 x_A - \sqrt{C_1^2 x_A^2 - (x_A^2 + y_A^2)(C_1^2 - y_A^2 l_3^2)}}{x_A^2 + y_A^2} \\ y_B = \frac{C_1 - x_A x_B}{y_A}, \end{cases} \quad 3.8$$

где

$$C_1 = \frac{1}{2}(l_3^2 - l_2^2 + x_A^2 + y_A^2). \quad 3.9$$

Далее определяем координаты X_P и Y_P мгновенного центра скоростей (МЦС) звена AB – точки P (рис. 3.4).

Для этого запишем уравнение прямой, проходящей через точки A и O_1 :

$$y = \frac{h + y_A}{x_A} x - h \quad 3.10$$

и уравнение прямой, проходящей через точки O_2 и B :

$$y = \frac{y_B}{x_B} x \quad 3.11$$

Решая совместно уравнения, находя тем самым точку их пересечения, получим:

$$\begin{cases} x_P = \frac{l \operatorname{tg} \varphi - h}{\frac{y_B}{x_B} - \operatorname{tg} \varphi} \\ y_P = \frac{y_B}{x_B} x_P. \end{cases} \quad 3.12$$

Наконец, находим расстояния от шарниров A и B до мгновенного центра скоростей звена AB – точки P :

$$\begin{aligned} AP &= \sqrt{(x_A - x_P)^2 + (y_A - y_P)^2}, \\ BP &= \sqrt{(x_B - x_P)^2 + (y_B - y_P)^2}. \end{aligned} \quad 3.13$$

Дальнейшие вычисления состоят в следующем: вычисляется мгновенная угловая скорость звена AB :

$$\omega_{AB} = \frac{v_A}{AP} \quad 3.14$$

где $v_A = \omega l_1$.

Вычисляется скорость шарнира B :

$$v_B = \omega_{AB} BP \quad 3.15$$

Вычисляется угловая скорость коромысла:

$$\omega_{O_2} = \frac{v_B}{l_3} \quad 3.16$$

Вычисляется скорость относительного перемещения режущего инструмента, определяющая величину продольной подачи.

$$v_C = \omega_{O_2} l_4 \quad 3.17$$

Таким образом получен алгоритм расчета, позволяющий вычислять скорость V_C как функцию угла поворота кривошипа O_1A для любого набора входных параметров.

Формула (3.16) позволяет вычислить только модуль угловой скорости, соответственно, и формула (3.17) – только модуль скорости подачи режущего инструмента.

Длина плеча O_2C (l_2) зависит и определяется радиусом вкладыша.

Длины l_1 , l_2 , l_3 должны удовлетворять условиям работоспособности (с учетом малости размера l), вытекающим из положения механизма при $\varphi=0^0$ (рис. 3.5, а) и при $\varphi=180^0$ (рис. 3.5, б):

$$\begin{aligned} (l_3 + l_2) - l_1 &> h \\ (l_1 + l_2) - l_3 &> h \end{aligned} \quad 3.18$$

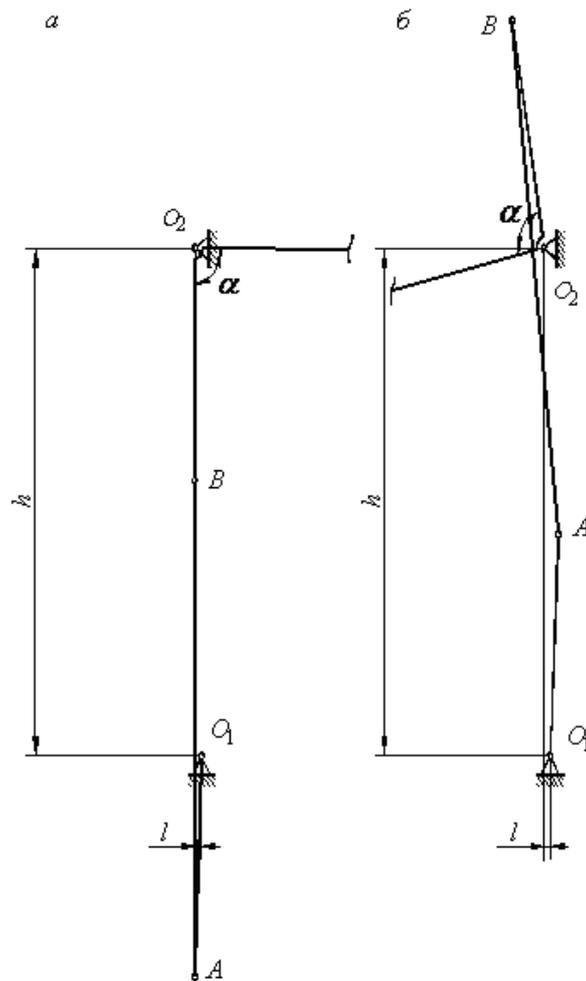


Рис. 3.5. Начальное и конечное положение кривошипно – кулисного механизма

Складывая два неравенства и вычитая одно из другого, получим два необходимых условия:

$$l_3 > l_1$$

$$l_2 > h$$

3.19

В результате определены оптимальные размеры звеньев $l=5$ мм, $l_1=120$ мм, $l_2=274$ мм, $l_3=124$ мм, $h=269$ мм, которые позволяют применять оборудование для подшипников диаметром от 800 мм. Регулирующим звеном является звено l_4 . Длина которого определяется радиусом обрабатываемого вкладыша подшипника.

Далее необходимо определить угол α , который должен обеспечивать прохождение фрезы по всей обрабатываемой поверхности (от угла $-\gamma_P$ до угла

$+\gamma_p$, как правило, $\gamma_p=60^\circ$) и перемещение фрезы за границы обрабатываемой поверхности на угол δ_γ для возможности осуществления продольной подачи вне зоны резания.

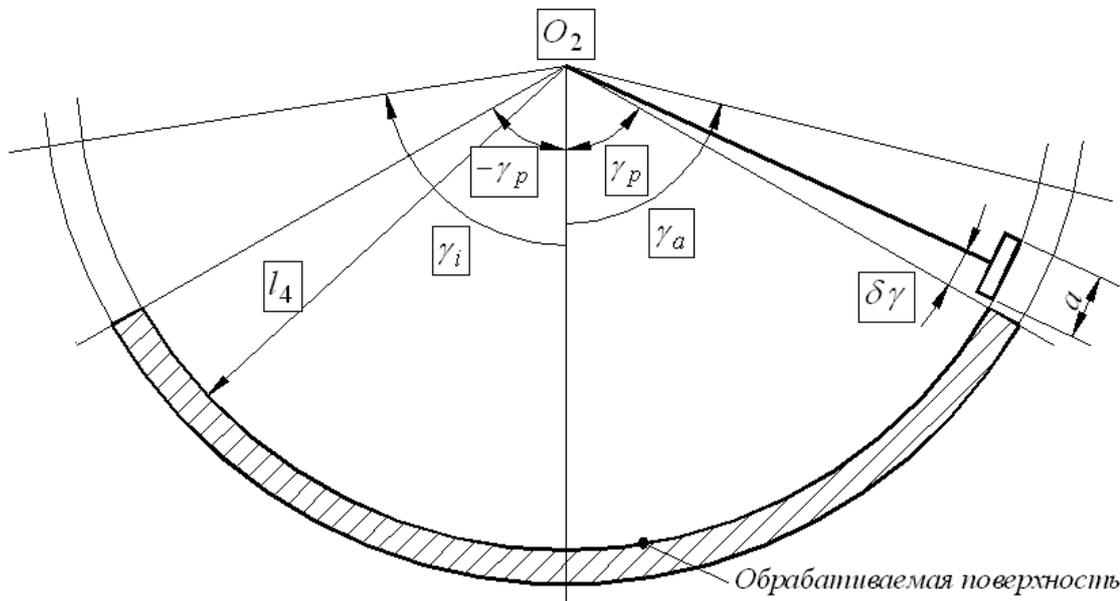


Рис. 3.6. Угол выхода фрезы за пределы обрабатываемой поверхности

Если размер подвеса a , то, учитывая, что $a \ll l_4$,

$$\delta\gamma = \frac{a}{2l_4} \quad 3.20$$

Таким образом, угол α должен обеспечивать отклонение плеча l_4 от вертикали вправо и влево на угол

$$\gamma_m = \gamma_p + \delta\gamma \quad 3.21$$

Минимальные условия обеспечения правильной работы станка выглядят следующим образом:

$$\gamma_a, \gamma_i > \gamma_m \quad 3.22$$

Рассчитаем углы γ_a и γ_i как функции угла α при следующих значениях входных параметров:

$$l = 0,0049 \text{ м}, \quad h = 0,271 \text{ м}, \quad l_1 = 0,12 \text{ м}, \quad l_2 = 0,274 \text{ м}, \quad l_3 = 0,124 \text{ м},$$

При размере подвеса $a = 0,3$ м и длине плеча коромысла $l_4 = 1,392$ м угол δ_γ равен

$$\delta\gamma = \frac{0,3}{2 \cdot 1,41} = 0,142 \text{ рад} = 6,1^\circ$$

следовательно,

$$\gamma_m = 60^\circ + 6,1^\circ = 66,1^\circ$$

На рис. 3.7 линия, соответствующая γ_m , обозначена как GAMm1, т.е. допустимые значения угла α лежат в интервале от 80° до 104° . При $\alpha=80^\circ$ "слева" фреза на 32° будет выходить за пределы обрабатываемой поверхности, "справа" – на 2° . При $\alpha=104^\circ$ "справа" фреза на 28° будет выходить за пределы обрабатываемой поверхности, "слева" – на 1° . И только при $\alpha=92^\circ$ "выходы" фрезы "справа" и "слева" будут одинаковыми – 18° .

При том же размере привода фрезы, но меньшей длине плеча коромысла – $l_4=0,7$ м (меньшем размере обрабатываемого подшипника) угол $\delta\gamma$ равен

$$\delta\gamma = \frac{0,3}{2 \cdot 0,7} = 0,214 \text{ рад} = 12,3^\circ$$

и, соответственно,

$$\gamma_m = 60^\circ + 12,3^\circ = 72,3^\circ$$

На рис. 3.7 линия, соответствующая новому значению γ_m , обозначена как GAMm2, т. е. допустимые значения угла α лежат в интервале от 86° до 98° .

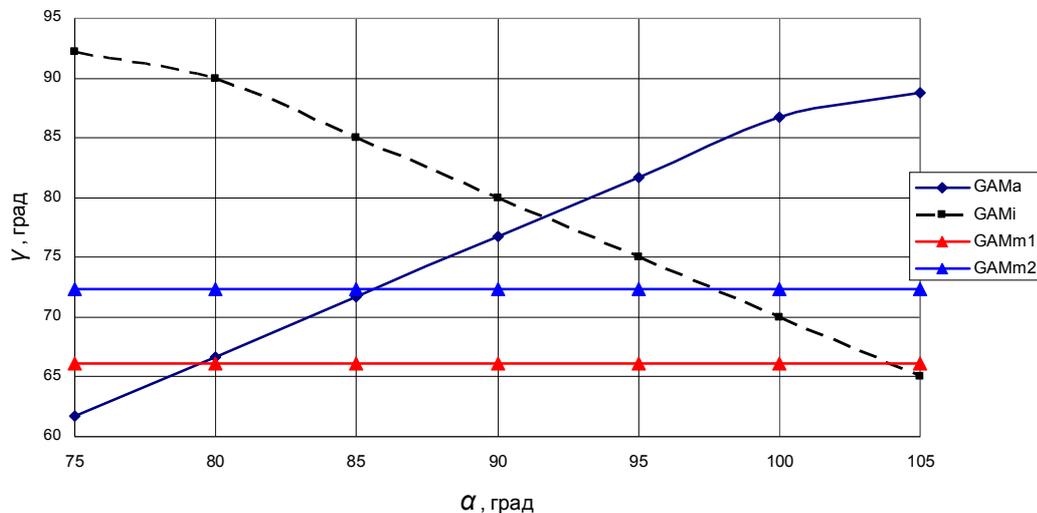


Рис. 3.7. График углов γ_a и γ_i как функции угла α

Таким образом, оптимальным значением угла α является угол 92° , "пригодный" для обработки подшипников и меньшего размера. Для изготовления станка удобнее принять оптимальным значение угла α равным 90° .

Представленный алгоритм расчета дает возможность выполнить оптимизацию параметров l_1 , l_2 , l_3 , α и ω с целью получения значений позволяющих:

- использовать механизм для различных типоразмеров крупногабаритных подшипников;
- обеспечить угол качания механизма, достаточный для выхода режущего инструмента за пределы обработки и реализации поперечной подачи;
- обеспечить скорость продольного перемещения инструмента, соответствующую требуемым технологическим параметрам, разработанным во второй главе.

Для обработки крупногабаритного подшипника скольжения, представленного в главе 1 на рис. 1.1 диаметром 2700 мм применим длину звена $l_4 = 1392$ мм.

Для указанных выше значений звеньев механизма проанализируем величину скорости перемещения режущего инструмента относительно обрабатываемой поверхности (рис. 3.8).

Угловая скорость ω_{O2} меняет знак при достижении экстремальных значений величиной Y_B в определенных угла поворота кривошипа φ . Расчет аналитических зависимостей для вычисления соответствующих значений φ представляется очень трудоёмким, но данная задача весьма просто решается с помощью программных средств.

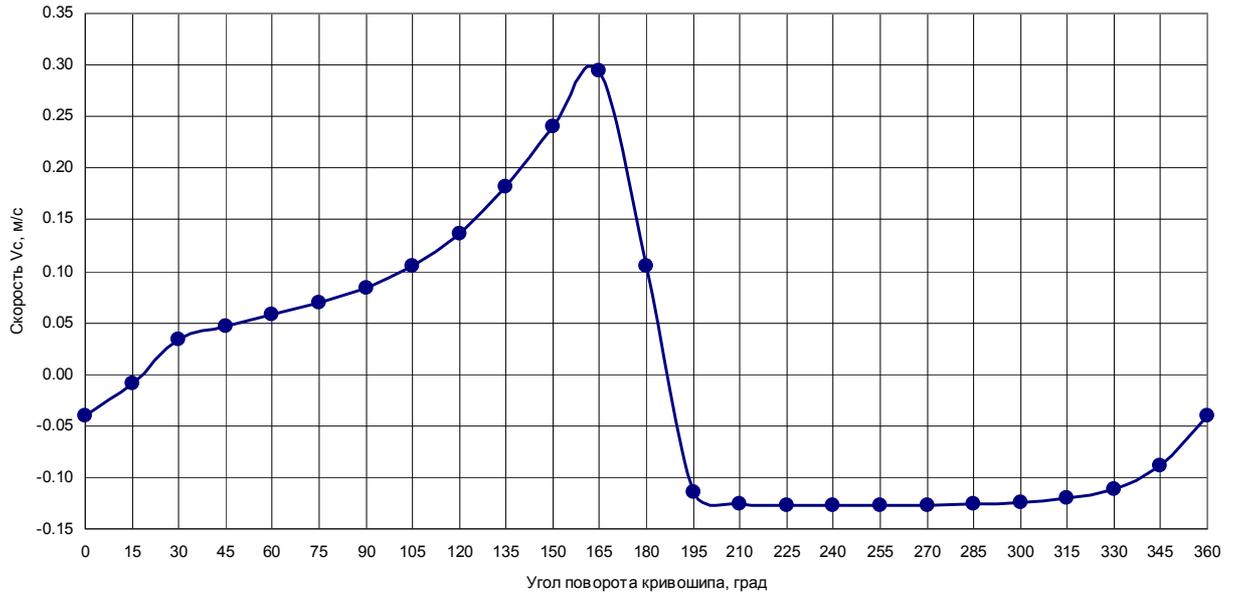


Рис. 3.8 Скорость относительного перемещения режущего инструмента в зависимости от угла поворота кривошипа

На график относительного перемещения режущего инструмента в зависимости от угла поворота кривошипа явно видны два этапа перемещения инструмента: с постоянной скоростью (рабочий ход, при угле поворота кривошипа 195^0-360^0) и с ускорением (холостой ход, при угле поворота кривошипа 0^0-195^0). Стабильность скорости перемещения при осуществлении рабочего хода обеспечивает постоянство качества поверхности, а повышение скорости холостого хода снижает время обработки в целом.

Выполним расчет положения режущего инструмента в зависимости от угла φ , то есть координат точки C .

Уравнение прямой, проходящей через точки O_2 и C , поскольку она проходит через начало координат, имеет следующий вид:

$$y = kx \quad 3.23$$

Угол между прямыми задан $-a$, тогда, используя еще и уравнение прямой, проходящей через точки O_2 и B , формула (3.11), получим

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{k - \frac{y_B}{x_B}}{1 + k \frac{y_B}{x_B}} \quad 3.24$$

откуда находим величину коэффициента k в уравнении (3.24):

$$k = \frac{x_B \operatorname{tg} \alpha + y_B}{x_B - y_B \operatorname{tg} \alpha} \quad 3.25$$

Решая систему уравнений

$$\begin{cases} y = kx \\ y^2 + x^2 = l_4^2 \end{cases} \quad 3.26$$

получаем:

$$\begin{cases} y_C = -\frac{|k| l_4}{\sqrt{1+k^2}} \\ x_C = \frac{y}{k} \end{cases} \quad 3.27$$

На рисунке 3.9 приведен пример расчета координат режущего инструмента.

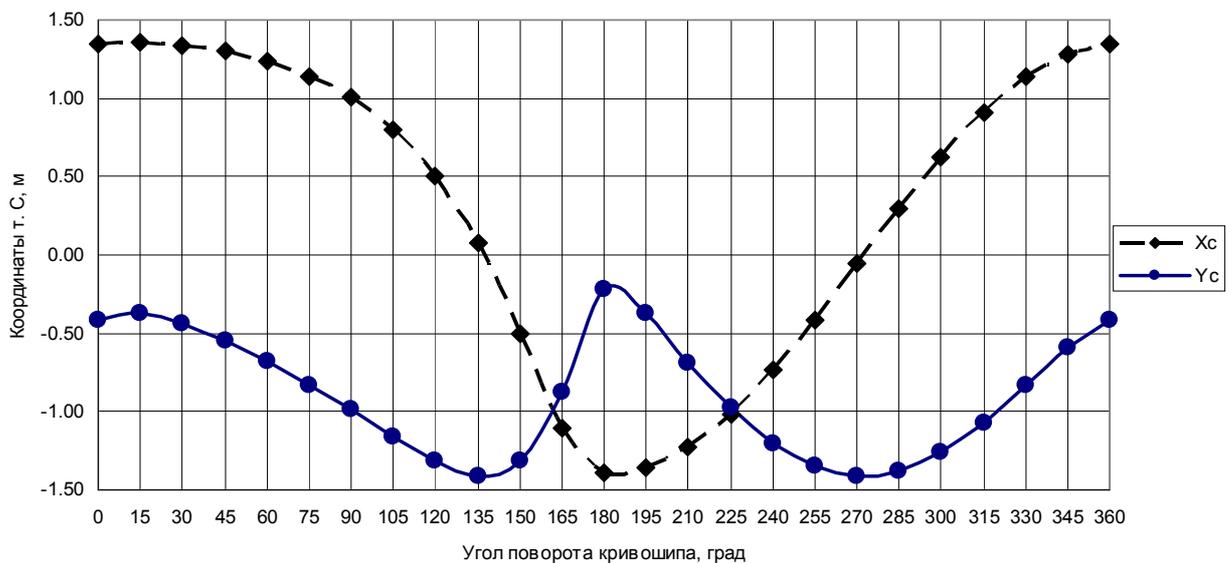


Рис. 3.9. Расчет координат режущего инструмента в зависимости от угла поворота кривошипа

Расчет координат режущего инструмента демонстрирует величину продольного перемещения режущего инструмента в каждом положении кривошипа, данные величины позволяют убедиться, что амплитуда качания подобрана оптимально, обеспечивает длину перебега и врезания инструмента.

3.2. Исследование кинематических параметров исполнительного механизма для обеспечения заданного качества обрабатываемой поверхности

Обеспечение качества опорной поверхности скольжения является важнейшей задачей при ремонте крупногабаритных подшипников скольжения. К данной поверхности предъявляют высокие требования по шероховатости и цилиндричности, которые формируют коэффициент и условия трения-скольжения, распределение масла по поверхности скольжения, её износостойкость и, как следствие, минимизация величины зазора в подшипнике в процессе эксплуатации, а как следствие долговечность прямолинейности оси печи, долговечность и бесперебойность работы подшипника скольжения и агрегата.

Обеспечение требуемого качества обрабатываемой поверхности скольжения (точность по 8 качеству и шероховатость Ra1,6-3,2) процессе механической обработки баббита необходимо проводить в определенном заданном интервале технологических параметров, рассмотренных во 2 главе. При фрезеровании баббита скорость резания и подача режущего инструмента значительно влияют на температуру в зоне резания, а значит и микрорельеф обработанной поверхности. Кинематические параметры специального оборудования, применяемого при ремонтной обработке, должны обеспечивать заданные технологические параметры, в свою очередь обеспечивающие требуемое качество обработанной поверхности.

В предшествующем параграфе получены значения скорости продольного перемещения и координаты режущего инструмента в

зависимости от угла поворота кривошипа. Однако, на плане скоростей (рис. 3.3) можно увидеть, что в зависимости от угла поворота равным участкам поворота кривошипа соответствуют разные по длине перемещения режущего инструмента. Следовательно, для проверки стабильности процесса резания и обеспечения технологических режимов необходимо получить значения скорости перемещения режущего инструмента относительно обрабатываемой поверхности в зависимости от угла поворота непосредственно стойки, на которой расположен инструмент. Расчетная схема представлена на рис. 3.4.

Входными параметрами для расчетов являются:

ω – угловая скорость вращения кривошипа O_1A ;

l_1, l_2, l_3, l_4 – длины кривошипа O_1A , связующего звена AB , плеч коромысла O_2B и O_2C , соответственно;

α – угол при вершине коромысла;

l, h – смещение оси коромысла O_2 относительно опоры O_1 по горизонтали и вертикали, соответственно.

Положение фрезы (точка C на рис. 3.9) будем определять углом γ , отсчитываемым от вертикали. При этом, когда фреза находится на правой половине обрабатываемой поверхности, угол γ будем считать положительным, когда на левой – отрицательным.

Перед тем как определять положения кривошипа O_1A в зависимости от угла γ , необходимо определить пределы изменения этого угла.

Начало системы координат расположим в точке O_2 , направления осей показаны на рис. 3.9. Тогда координаты шарнира A в зависимости от угла поворота кривошипа φ определяются формулами

$$\begin{cases} x_A = l + l_1 \sin \varphi \\ y_A = -h - l_1 \cos \varphi \end{cases} \quad 3.29$$

а координаты шарнира B могут быть определены из условий, что он находится на расстоянии l_2 от шарнира A и на расстоянии l_3 от оси коромысла O_2 :

$$\begin{cases} x_B^2 + y_B^2 = l_3^2 \\ (x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2 = l_2^2 \end{cases} \quad 3.30$$

Полученная система уравнений имеет следующее решение:

$$\begin{cases} x_B = \frac{A x_A - \sqrt{A^2 x_A^2 - (x_A^2 + y_A^2) (A^2 - y_A^2 l_3^2)}}{x_A^2 + y_A^2} \\ y_B = \frac{A - x_A x_B}{y_A} \end{cases} \quad 3.31$$

где

$$A = \frac{1}{2} (l_3^2 - l_2^2 + x_A^2 + y_A^2) \quad 3.32$$

Предельные положения фрезы достигаются тогда, когда координата по оси y шарнира B – y_B , достигает максимума и минимума. Поскольку координата y_B является непрерывной функцией угла φ , в точках экстремума должно выполняться условие:

$$\frac{\partial y_B}{\partial \varphi} = 0 \quad 3.33$$

Дифференцируя первое равенство в (3.26), получим

$$\frac{\partial x_B}{\partial \varphi} = -\frac{y_B}{x_B} \frac{\partial y_A}{\partial \varphi} \quad 3.34$$

используя которое, а также формулы, вытекающие из (3.23):

$$\begin{aligned} \frac{\partial x_A}{\partial \varphi} &= l_1 \cos \varphi \\ \frac{\partial y_A}{\partial \varphi} &= l_1 \sin \varphi \end{aligned} \quad 3.35$$

из продифференцированного второго равенства (3.30), найдем:

$$\left(-\frac{y_B}{x_B} (x_B - x_A) + (y_B - y_A) \right) \frac{\partial y_B}{\partial \varphi} = (x_B - x_A) l_1 \cos \varphi + (y_B - y_A) l_1 \sin \varphi \quad 3.36$$

Таким образом, условие (3.33) выполняется, если

$$(x_B - x_A) \cos \varphi + (y_B - y_A) \sin \varphi = 0 \quad 3.37$$

Уравнение (3.37) на интервале изменения угла φ от 0 до 2π имеет два решения, для каждого набора входных параметров решается численно, поскольку в нем и x_A , y_A , и x_B , y_B являются функциями угла φ .

Зависимость получена при следующих значениях входных параметров:

$$l = 0,0049 \text{ м}, h = 0,271 \text{ м}, l_1 = 0,12 \text{ м}, l_2 = 0,274 \text{ м}, l_3 = 0,124 \text{ м}$$

Полученные в результате решения уравнения (3.37) два значения угла φ обозначим как φ_i (для минимального значения угла γ) и φ_a (для максимального значения угла γ).

Соответствующие им значения угла γ определяются следующим образом. Уравнение прямой, на которой лежит отрезок O_2B , имеет вид

$$y = \frac{y_B}{x_B} x \quad 3.38$$

а уравнение прямой, на которой лежит отрезок O_2C :

$$y = -\text{ctg} \gamma x \quad 3.39$$

Поскольку угол между O_2B и O_2C – α , то

$$\text{tg} \alpha = \frac{-\text{ctg} \gamma - \frac{y_B}{x_B}}{1 - \text{ctg} \gamma \frac{y_B}{x_B}} \quad 3.40$$

откуда следует, что

$$\text{tg} \gamma = \frac{y_B \text{tg} \alpha - x_B}{x_B \text{tg} \alpha + y_B} \quad 3.41$$

Таким образом, если вычислить x_B и y_B (формулы (3.31)) при значениях φ , равных φ_i и φ_a , по формуле 3.41 находятся граничные (предельные) значения угла γ – γ_i и γ_a .

Так, для заданных значений входных факторов и угла $\alpha=90^\circ$,

$$\begin{aligned} \varphi_a &= 12,54^\circ; & \gamma_a &= 76,69^\circ; \\ \varphi_i &= 183,85^\circ; & \gamma_i &= -79,98^\circ \end{aligned} \quad 3.42$$

При $\alpha=90^\circ$ формула 3.41 может быть записана в виде

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{x_B - \frac{y_B}{\operatorname{tg} \alpha}}{\frac{x_B}{\operatorname{tg} \alpha} - y_B} = -\frac{x_B}{y_B} \quad 3.43$$

Вычислив пределы изменения угла $\gamma - \gamma_i$ и γ_a далее необходимо, с целью вычисления скорости подачи, вычислить, для любого значения угла γ в интервале $\gamma_i \leq \gamma \leq \gamma_a$ соответствующее ему значение угла φ .

Задавшись значением угла γ , преобразованием формулы 3.43, находим

$$\frac{y_B}{x_B} = \frac{1 + \operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \gamma}{\operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \gamma} \quad 3.44$$

добавив к полученному уравнению первое уравнение 3.30, из системы двух уравнений определяем координаты точки B :

$$\begin{cases} x_B = -l_3 \sin(\alpha - \gamma) \\ y_B = -l_3 \cos(\alpha - \gamma) \end{cases} \quad 3.45$$

Координаты точки A определяются из системы уравнений

$$\begin{cases} (x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2 = l_2^2 \\ (x_{O1} - x_A)^2 + (y_{O1} - y_A)^2 = l_3^2 \end{cases} \quad 3.46$$

решение которой дается формулами:

$$\begin{cases} x_A = \frac{E_1 \pm \sqrt{E_1^2 - (1 - C_1^2) E_0}}{1 + C_1^2} \\ y_A = C_1 x_A + C_0, \end{cases} \quad 3.47$$

где

$$\begin{aligned} E_1 &= l - h C_1 - C_0 C_1 \\ E_0 &= l^2 + h^2 + 2h C_0 + C_0^2 - l_1^2 \end{aligned} \quad 3.48$$

и, в свою очередь,

$$\begin{aligned}
 C_1 &= \frac{l - x_B}{h + y_B} \\
 C_0 &= -\frac{l_2^2 - l_1^2 - l_3^2 + l^2 + h^2}{2(h + y_B)}
 \end{aligned}
 \tag{3.49}$$

По вычисленным значениям x_A и y_A являющимся функциями угла γ , определяется искомое значение угла φ по формулам, обратным формулам (3.29):

$$\begin{cases}
 \sin \varphi = \frac{x_A - l}{l_1} \\
 \cos \varphi = -\frac{y_A + h}{l_1}
 \end{cases}
 \tag{3.50}$$

В выражении 3.47 знак "+" принимается при изменении угла γ от γ_a до γ_i (холостой ход) и знак "-" при изменении угла γ от γ_i до γ_a (фрезерование).

Дальнейшие расчеты – расчет скорости перемещения (величина подачи) фрезы для вычисленного угла φ , производится следующим образом:

– определяются координаты точки P (мгновенного центра скоростей звена AB):

$$\begin{cases}
 x_P = \frac{(hx_A + ly_A)x_B}{y_B(l - x_A) + x_B(h + y_A)} \\
 y_P = \frac{y_B}{x_B} x_P
 \end{cases}
 \tag{3.51}$$

– рассчитываются расстояния от точек A и B до точки P :

$$\begin{aligned}
 AP &= \sqrt{(x_A - x_P)^2 + (y_A - y_P)^2} \\
 BP &= \sqrt{(x_B - x_P)^2 + (y_B - y_P)^2}
 \end{aligned}
 \tag{3.52}$$

– вычисляется скорость подачи фрезы:

$$V_C = \omega \frac{l_1 l_4 BP}{l_3 AP}
 \tag{3.53}$$

Для принятых выше значений звеньев механизма ($l_1=120$ мм, $l_2=274$ мм, $l_3=124$ мм, $l_4=1392$ мм) проанализируем обеспечение заданных

технологических параметров, разработанных во 2 главе для различных значений n .

На рис. 3.10 представлена скорость "холостого" хода, на рис. 3.11 – скорость перемещения инструмента, соответствующая продольной подаче.

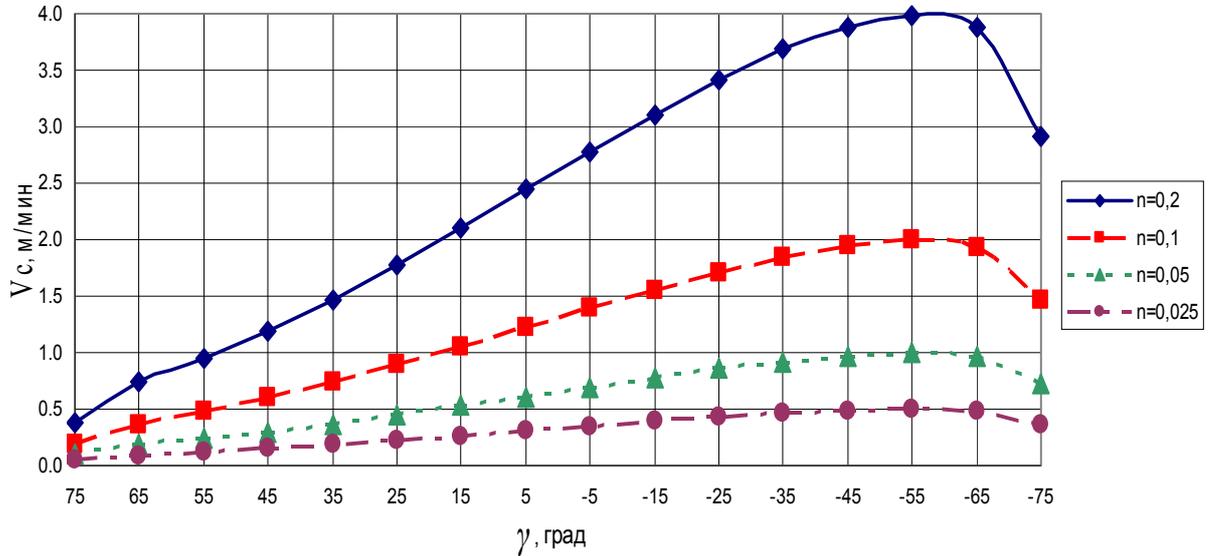


Рис. 3.10. Изменение скорости холостого хода от угла поворота стойки коромысла

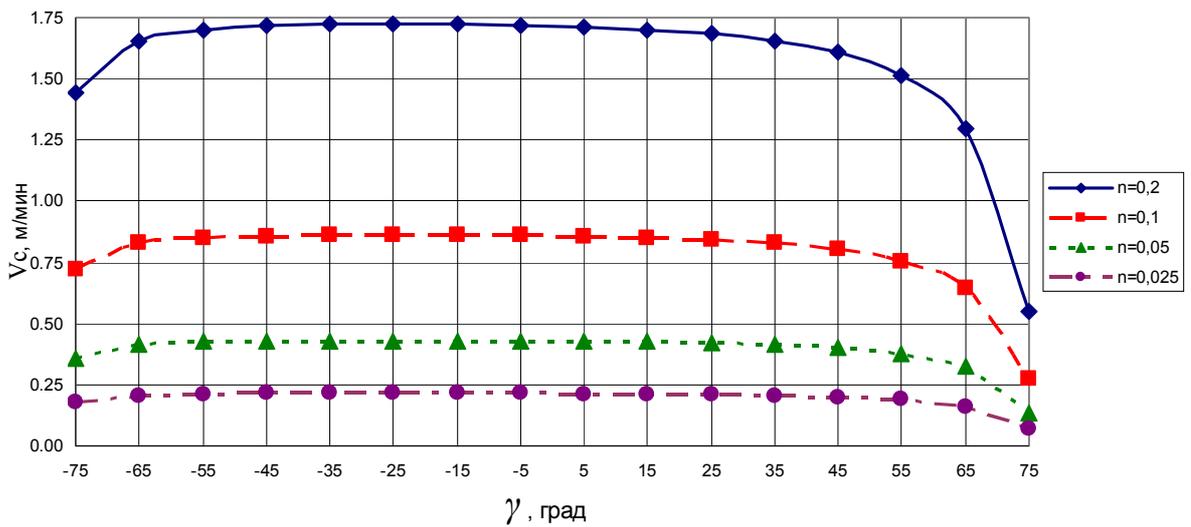


Рис. 3.11. Изменение величины продольной подачи фрезы от угла поворота стойки коромысла

Анализируя графики можно сделать вывод, что в процессе обработки значение подачи изменяется не значительно, что обеспечивает равномерность протекания процесса фрезерования. Угол раскрытия подшипника составляет 120° , следовательно, обработка идет при значениях угла $-60^{\circ} \leq \gamma \leq 60^{\circ}$, после прохождения данных значений происходит выход инструмента за обрабатываемую поверхность.

3.3. Разработка конструктивного исполнения станочного модуля

В соответствии с кинематическими параметрами, разработанными в параграфе 3.1 и 3.2 предлагается конструктивная схема специального оборудования, представленная на рис. 3.12, 3.13.

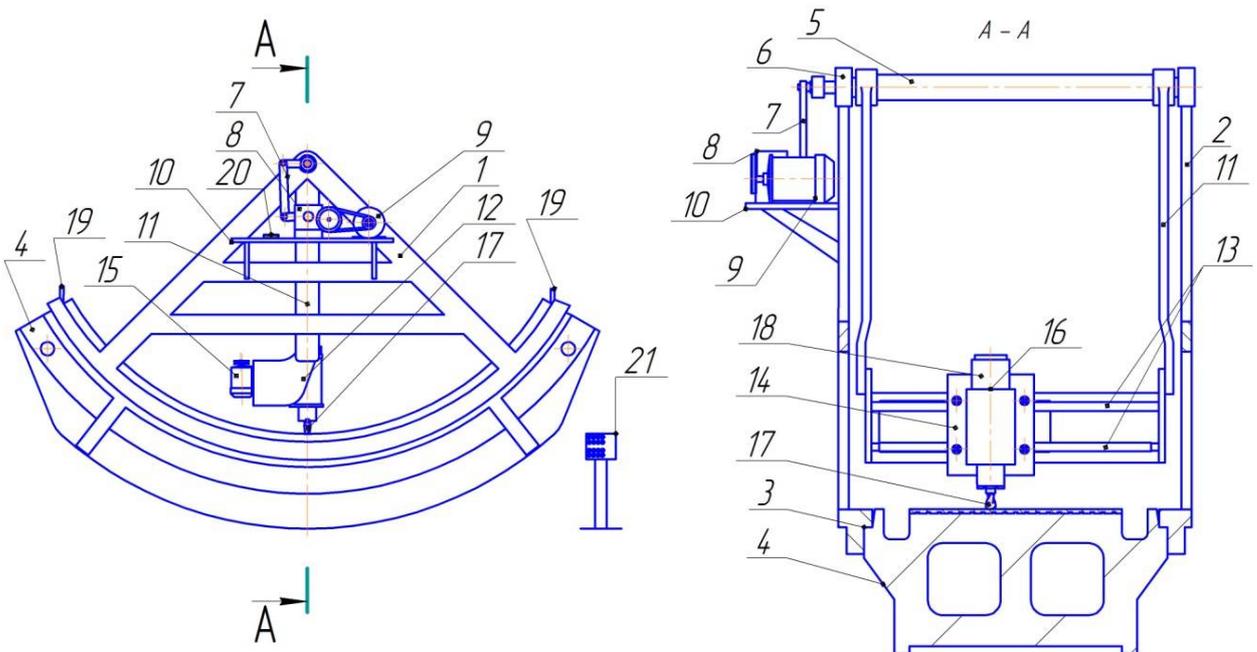


Рис. 3.12. Конструктивная схема станка

Станок состоит из корпуса, выполненного в виде двух сегментных рам 1 и 2, которые нижней частью опираются на проточку сектора подшипника скольжения 4, специально обработанной поверхность (проточкой) 3. Основной элемент станка – приводной вал 5 расположен в подшипниковых узлах 6 в верхней части рам 1 и 2. Через неподвижное шпоночное соединение приводной вал 5 получает движение от конечного звена кривошипно-

коленного механизма 7 привода маятниковой круговой подачи. На полке 10 рамы 1 установлены и жестко закреплены редуктор 8 и электродвигатель 9, которые входят в состав привода маятниковой круговой подачи. Качающаяся рама 11 установлена и жестко закреплена шпоночным соединением на приводном валу 5. Конечным звеном качающейся рамы 11 является рабочий узел 12, который установлен в её нижней части и неподвижно закреплен. В состав рабочего узла 12 входят направляющие 13, с установленным на них линейным модулем 14. Линейный модуль 14 перемещается по направляющим 13 при включении шагового двигателя привода продольного перемещения 15. Обрабатываемый инструмент – фреза 17 установлена в фрезерной бабке 16, которая с помощью болтового соединения неподвижно закреплена на линейном модуле 14. Фреза 17 получает вращение от привода главного движения 18, который установлен сверху фрезерной бабки 16. Лазерные датчики 19, отслеживающие положение фрезы, установлены на концах проточек рам 1 и 2. Управляющий модуль 20 на микроконтроллерах с устройством ввода-вывода установлен на полке 10 рамы 1. Сигнал на входы управляющего модуля 20 подаётся от лазерных датчиков 19, выходной сигнал из управляющего модуля через панель управления 21 направляется в шаговый двигатель продольного перемещения 15 и линейный модуль 14 [83].

Для обработки баббитовых вкладышей крупногабаритных подшипников скольжения станок устанавливается специальными проточками 3 рам 1 и 2 на соответствующие проточки сектора подшипника скольжения 4 и закрепляется, например при помощи болтов. Выполнение опорных элементов в виде специальных проточек 3, соответствующих проточкам подшипника скольжения 4 позволяет увеличить площадь контакта базовых поверхностей сектора подшипника скольжения 4 с рамами 1 и 2. При этом достигается лучшее совпадение оси сектора подшипника скольжения 4 и оси вращения качающейся рамы 11, что повышает точность обработки. Затем включается привод главного движения 18 фрезы 17. Одновременно с приводом главного движения 18 включается

электродвигатель 9, который через редуктор 8 передаёт вращательное движение на кривошипно – коленный механизм 7, где движение преобразуется в маятниковые колебания приводного вала 5, опирающегося на подшипниковые узлы 6, вместе с качающейся рамой 11, рабочим узлом 12, направляющими 13, линейным модулем 14, фрезерной бабкой 16, фрезой 17 и остальными элементами, закрепленными на рабочем узле 12. Угол качания рабочего узла 12 в процессе работы станка должен обеспечивать длину врезания инструмента, рабочий ход и длину перебега. При выходе фрезы 17 за сектор подшипника скольжения 4 – луч лазерных датчиков 19 пересекается фрезой 17, информация об этом подается на управляющий модуль 20. Управляющий модуль 20 подает сигнал на включение линейного модуля 14, который поднимает фрезу 17, для обеспечения зазора между обработанной поверхностью сектора подшипника скольжения 4 и фрезой 17. Станок совершает холостой ход (качание назад), при выходе фрезы 17 за сектор подшипника скольжения 4 с другой стороны – луч лазерных датчиков 19 пересекается фрезой 17, информация об этом подается на управляющий модуль 20, который подает сигналы на включение линейного модуля 14 для возврата фрезы 17 в рабочее положение и шаговый двигатель привода продольных перемещений 15, который перемещает фрезу 17 на заданную ширину фрезерования. Таким образом, в результате этих действий фреза 17 совершает маятниковые качания на требуемом радиусе сектора подшипника скольжения 4 и перемещается при этом вдоль его оси вместе с линейным модулем 14 по направляющим 13 со скоростью, определяемой шаговым двигателем привода продольных перемещений 15.

Включение в конструкцию станка лазерных датчиков 19 и управляющего модуля 20 позволяет обеспечить работу станка после настройки в автоматическом режиме – без участия оператора, что повышает точность обработки баббитового вкладыша сектора подшипника скольжения исключая «человеческий фактор». Включение в конструкцию станка

линейного модуля 14 и панели управления 21 позволяет настраивать станок на обрабатываемый размер с большей точностью.

После окончания цикла обработки измеряется обработанный радиус сектора подшипника скольжения 4 и при необходимости после настройки положения фрезы 17 обработка повторяется.

Ручное управление станком и настройка на обрабатываемый размер осуществляются с панели управления 21.

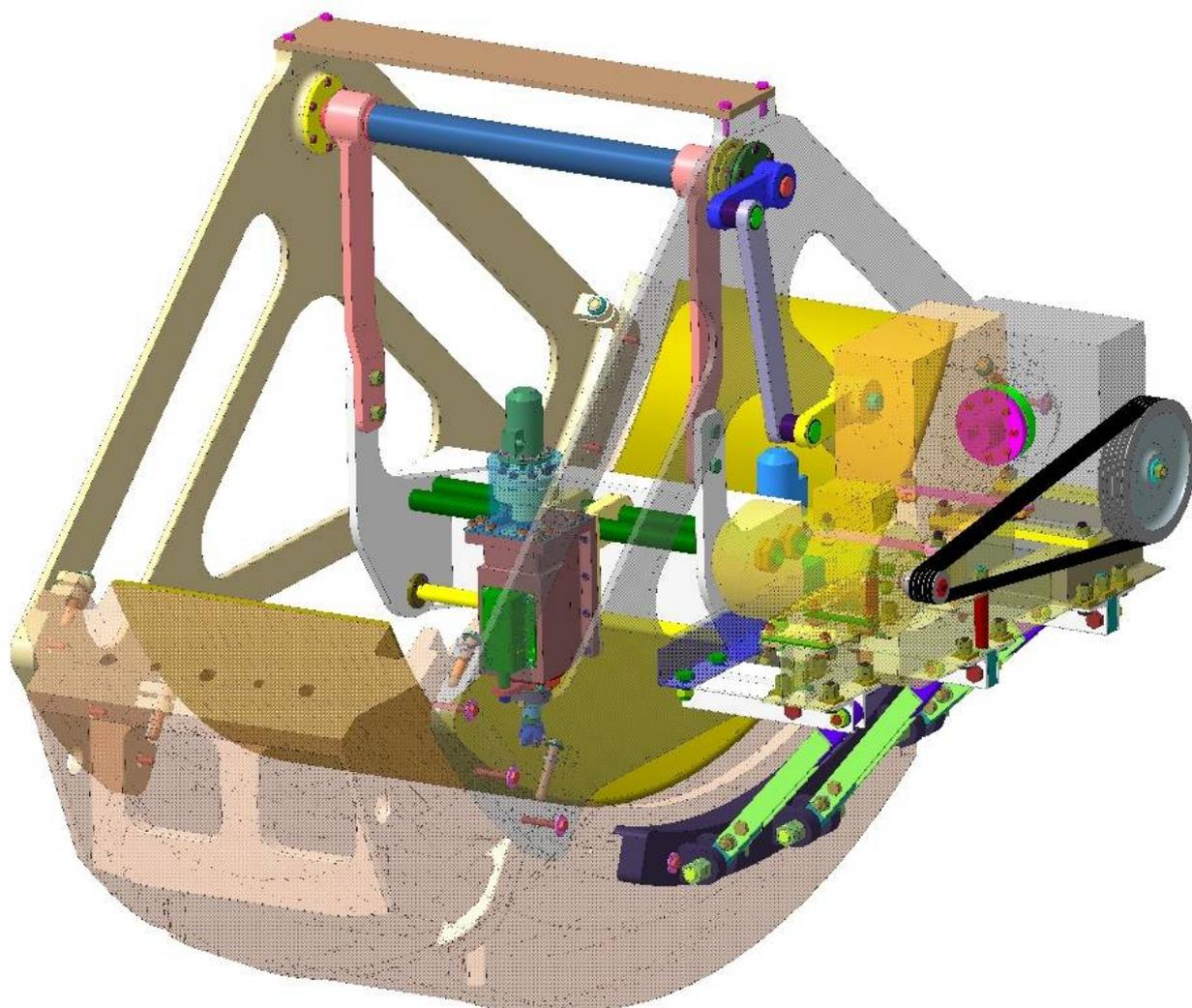


Рис. 3.13. Общий вид станочного модуля

Для обеспечения необходимых параметров обработки внутренней поверхности необходимо обеспечить совпадение оси обработки (оси вала 5) и оси вращения цапфы в подшипнике скольжения. Для этого необходимо

выдержать требуемый размер между осью вала и режущим. Составим размерную цепь станка (рис. 3.14), необходимую для обеспечения требуемого диаметра обработки, выделим замыкающие звенья, обеспечивающие требуемые параметры точности:

1. Размер между нижними точками опоры на корпус подшипника (основная база) и нижней точкой обработанной поверхности (вспомогательная база);
2. Соосность осей отверстий под подшипники;
3. Параллельность осей отверстий под подшипники.

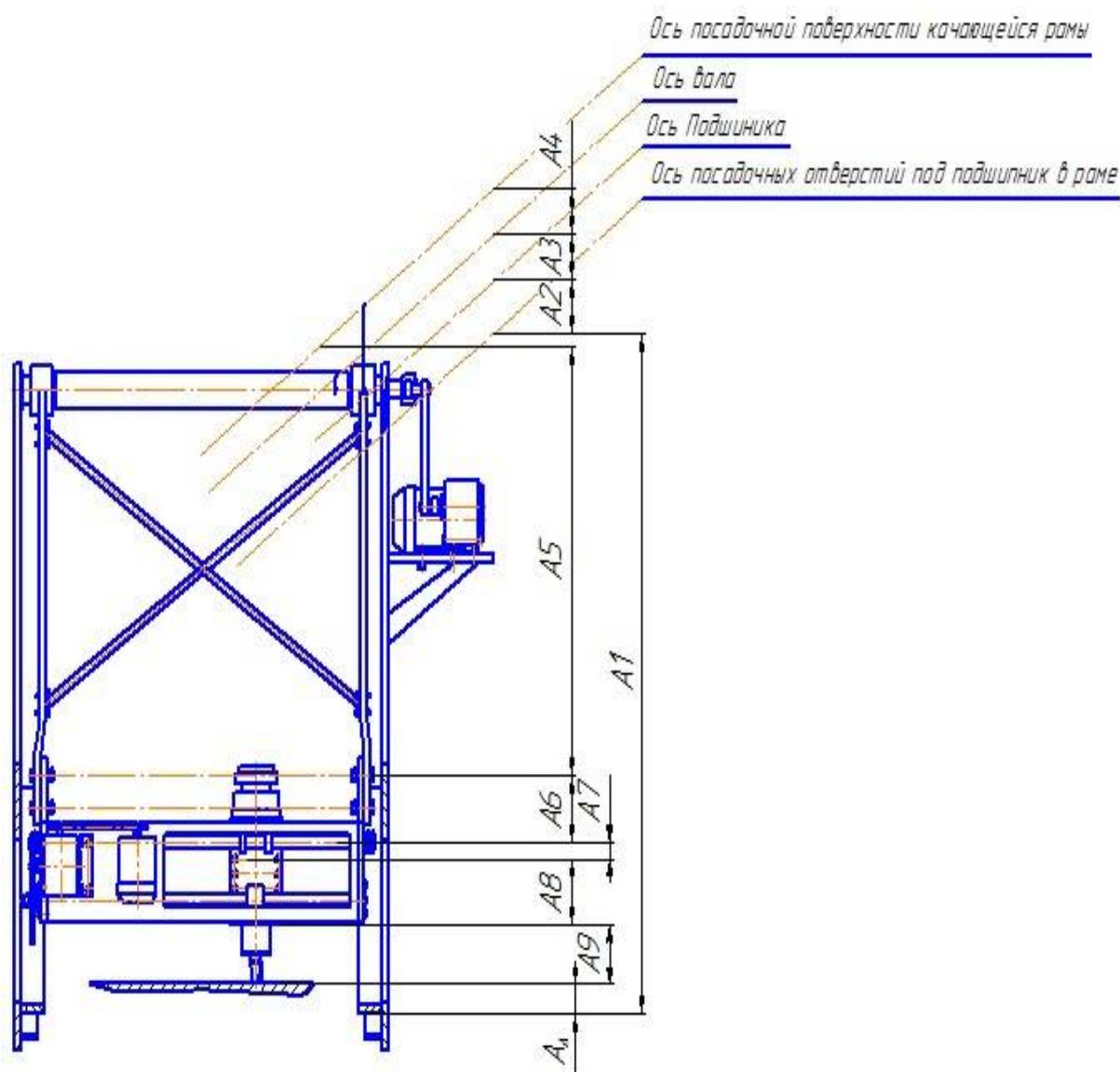


Рис.3.14. Размерная цепь станочного модуля

Значения основных параметров, характеризующих представленную размерную цепь, сведены в табл.3.1

Таблица 3.1

Основные параметры размерной цепи A

Звено	Номинальное значение размера, мм	Поле допуска, мм	Координата середины поля допуска	Допустимые отклонения
A_1	1460	3,1	-1,65	Допуск на размер от опорной поверхности башмаков станка до оси отверстия под подшипники в раме
A_2	0	0,1	+0,05	Соосность отверстия под подшипник в раме и внутренней обоймы подшипника
A_3	0	0,1	+0,05	Соосность внутренней обоймы подшипника и оси приводного вала
A_4	0	0,1	+0,05	Соосность оси приводного вала и осей посадочных поверхностей качающейся рамы
A_5	902	2,3	0	Допуск на размер от осей качающихся кулис до подвеса
A_6	157	1	-0,5	Допуск на размер от подвеса до направляющей
A_7	38	1	-0,5	Допуск на размер от направляющей до крепежных отверстий фрезерной бабки
A_8	155	0,16	-0,08	Допуск на размер от крепежных отверстий до фрезерной бабки
A_9	70	0,3	-0,15	Доп. на размер от фрез. бабки до вылета фрезы

Рассмотрим некоторые допуски, заложенные в конструкцию станка. Допуск на размер A_1 выбирался исходя из возможности и целесообразности способа изготовления рам. Наилучшим способом изготовления такой рамы является изготовление частей и сварка их между собой, при этом точность сборки и относительного расположения поверхностей рамы друг относительно друга соответствуют 14 качеству.

Допуски на размеры A_2 , A_3 , A_4 выбирались по рекомендациям в зависимости от функционального назначения изделия. Допуск звена A_5

устанавливается в зависимости от способа изготовления кулисы. Наилучшим способом изготовления является изготовление втулки кулисы с последующим её закреплением на теле кулисы и сверлением отверстий для крепления подвеса. Допуски на размеры A_6 , A_7 , A_8 и A_9 устанавливались по рекомендациям в зависимости от функционального назначения изделия.

По методу максимума-минимума рассчитаем следующие параметры замыкающего звена при заданных параметрах составляющих звеньев:

номинальное значение, мм

$$A_{\Delta} = \vec{A}_1 - (\vec{A}_2 + \dots + \vec{A}_9) = 1460 - (0 + 0 + 0 + 902 + 157 + 38 + 155 + 70) = 138 \quad 3.54$$

Допуск на размер замыкающего звена [мм]:

$$\begin{aligned} TA_{\Delta} &= TA_1 - (TA_2 + TA_3 + TA_4 + TA_5 + TA_6 + TA_7 + TA_8 + TA_9) = \\ &= -3,1 - (0,1 + 0,1 + 0,1 - 2,3 - 1 - 1 - 0,16 - 0,3) = 1,26 \end{aligned} \quad 3.55$$

координата середины поля допуска, мм:

$$\begin{aligned} ECA_{\Delta} &= E\vec{C}A_1 - (E\vec{C}A_2 + E\vec{C}A_3 + E\vec{C}A_4 + E\vec{C}A_5 + E\vec{C}A_6 + E\vec{C}A_7 + E\vec{C}A_8 + E\vec{C}A_9) = \\ &= -1,65 - (0,05 + 0,05 + 0,05 - 0 - 0,5 - 0,5 - 0,08 - 0,15) = -0,57 \end{aligned} \quad 3.56$$

верхнее и нижнее отклонения соответственно, мм

$$ESA_{\Delta} = ECA_{\Delta} + \frac{TA_{\Delta}}{2} = 0,57 + 0,63 = 1,2 \quad 3.57$$

$$EIA_{\Delta} = ECA_{\Delta} - \frac{TA_{\Delta}}{2} = 0,57 - 0,53 = -0,06 \quad 3.58$$

Таким образом, получаем размер $138_{-0,06}^{1,2}$ мм, что соответствует 14 качеству точности. Точность изготовления составляющих частей станка повышать нецелесообразно в связи с их значительным удорожанием. Для обеспечения необходимой точности, предъявляемой к изделию, необходимо применять индивидуальную настройку методом пробных промеров и проходов или осуществлять настройку вылета режущего инструмента по специальному дополнительному установу, жестко связанному с базовой поверхностью.

3.4. Моделирование кинематики и динамики станочного модуля

Результаты кинематического расчета исполнительного механизма (п.3.1, 3.2) и объемная детализированная модель станочного модуля, созданная в системе автоматизированного проектирования КОМПАС-3D (рис. 3.13) использованы для построения имитационной модели (рис.3.15) и объемного виртуального прототипа (рис.3.16) в программном комплексе MSC Adams с целью кинематического и динамического анализа.

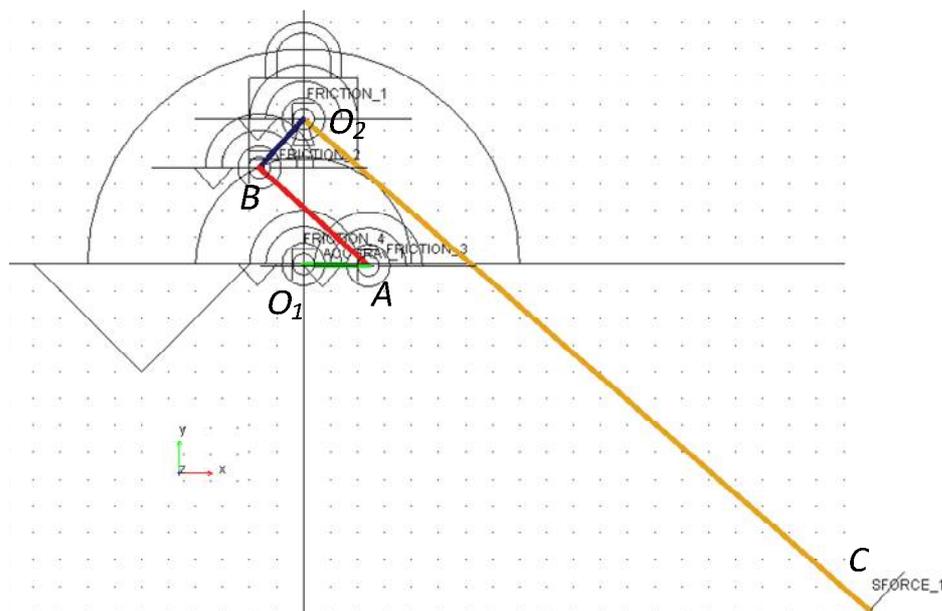


Рис. 3.15. Компьютерная модель механизма станочного модуля в среде MSC Adams с наложенными связями и движением

В соответствии с расчетной схемой (рис. 3.4) модель механизма состоит из четырех твердых тел. Звенья O_1A , AB , BO_2 , O_2C заданы стандартными телами системы MSC Adams типа link, массы и моменты инерции которых определены по детализированной модели, созданной в системе автоматизированного проектирования КОМПАС-3D. Звено BO_2 связано с *Ground* при помощи *RevoluteJoint*, а со звеном O_2C шарниром типа *FixedJoint*. Остальные звенья связаны между собой посредством *RevoluteJoint*. К звену O_1A посредством *RotationalJointMotion* приложена постоянная скорость вращения $n=0,092$ мин⁻¹. В качестве внешних сил были

заданы силы сопротивления в поворотных шарнирах, а в точке C приложена сила резания F , направленная по нормали к звену O_2C .

Объемный виртуальный прототип станочного модуля (рис.3.16) реализован с использованием модуля Adams.Machinery. Передача крутящего момента от двигателя к редуктору, связанного с кривошипом, осуществляется при помощи ременной передачи, созданной при помощи модуля Machinery Belt, а при создании цепи поперечной подачи использован модуль Machinery Chain, что позволяет исследовать влияние присущих данным передач нелинейностей на динамику работы всего устройства.

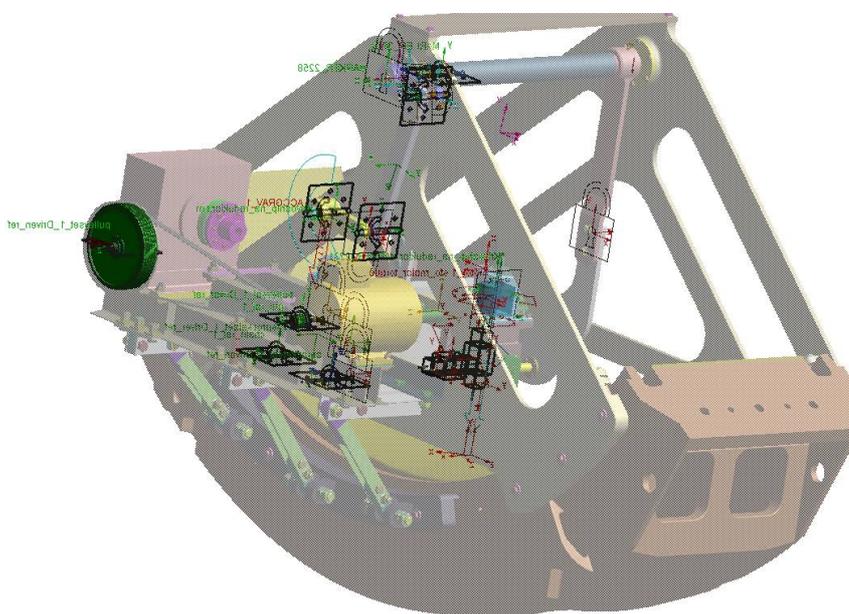


Рис. 3.16. Виртуальный прототип станочного модуля в среде MSC Adams с наложенными связями и движением

Кинематический анализ механизма показал траекторию движения и скорость продольной подачи режущего инструмента относительно обрабатываемой поверхности, а также позволил рассчитать размеры составляющих звеньев, позволяющие обеспечивать необходимую длину врезания и перебега режущего инструмента (рис 3.17).

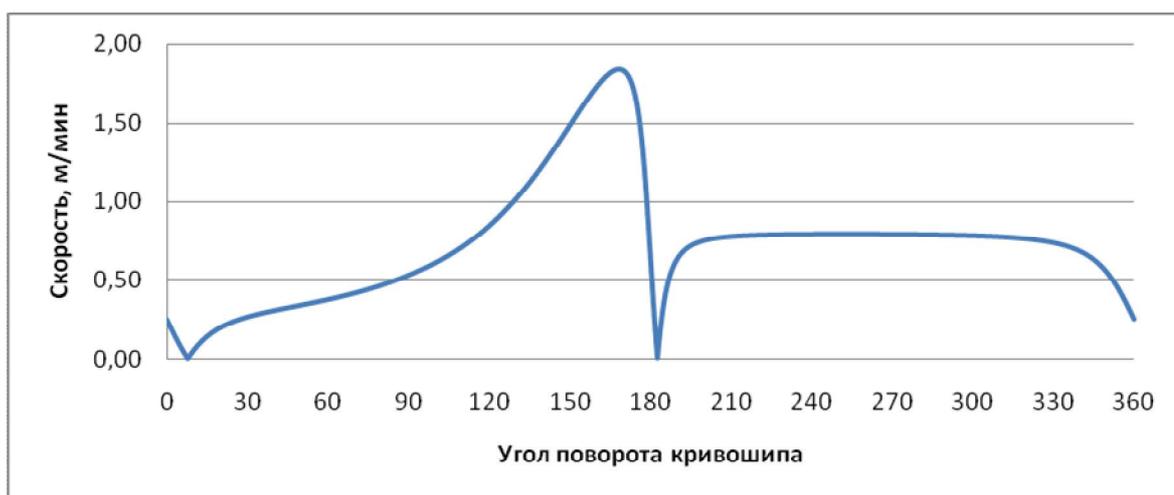


Рис. 3.17. Результаты кинематического анализа в среде MSC Adams

На рисунке 3.17 изображена скорость перемещения режущего инструмента в зависимости от положения кривошипа. Угол поворота кривошипа 0° – 180° соответствует ускоренному перемещению режущего инструмента на холостом ходу, а угол поворота 180° – 360° характеризуется постоянной скоростью резания, которая необходима на рабочем ходу инструмента. Стабильное значение скорости резания на рабочем ходу обеспечивает непрерывность и стабильность процесса обработки и позволяет подобрать оптимальное значение подачи режущего инструмента на зуб фрезы, например $S_z=0,12$ мм/зуб. Повышение скорости на этапе холостого хода снижает общее время операции.

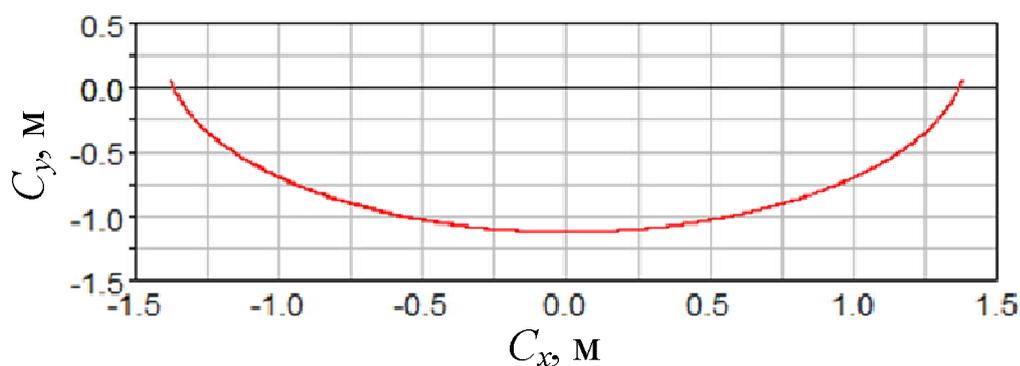


Рис. 3.18. График движения режущего инструмента

Произведенный динамический анализ механизма позволил определить силомоментные характеристики: динамические реакции в подшипниковых

опорах рам (рис. 3.20) и момент сопротивления M , который необходимо преодолеть для обеспечения постоянства скорости вращения n на валу кривошипа (рис. 3.19).

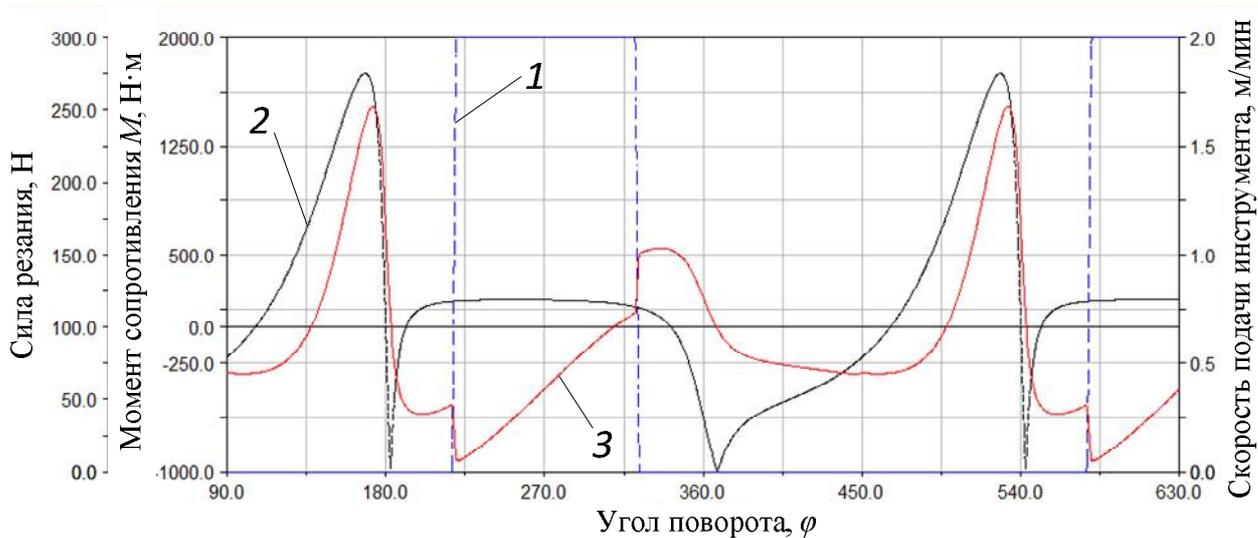


Рис. 3.19. Результаты моделирования механизма в среде MSC Adams:

1 – сила резания; 2 – скорость подачи инструмента; 3 – момент сопротивления

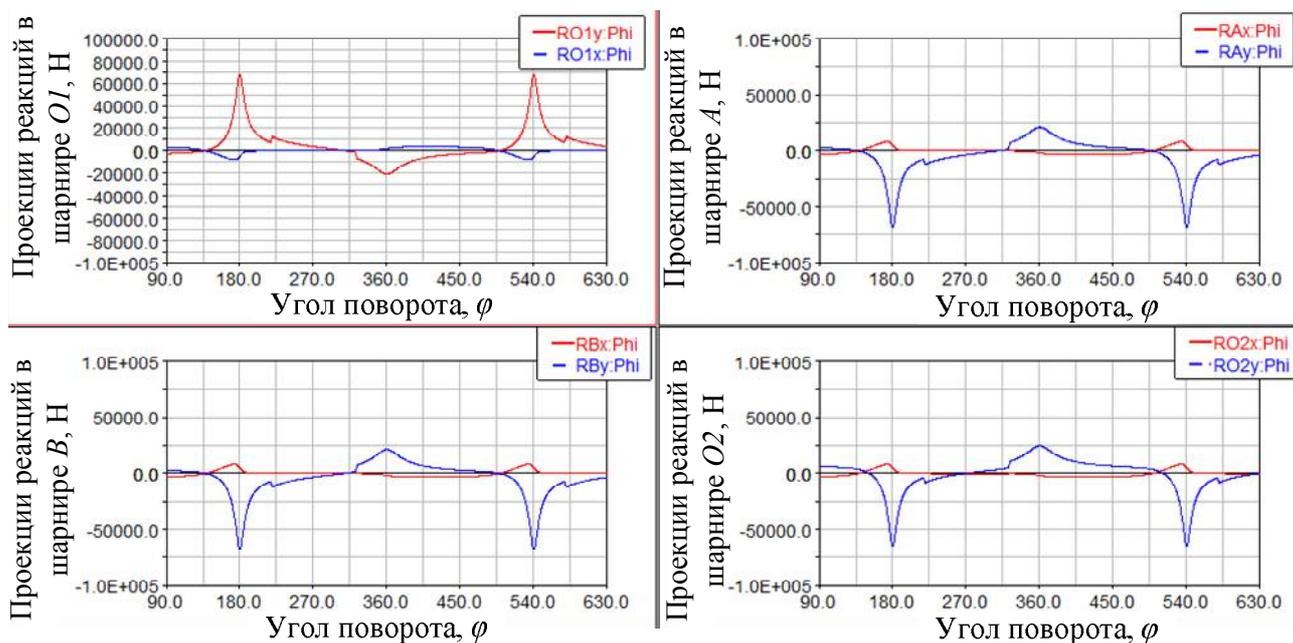


Рис. 3.20. Графики проекций динамических реакций в соответствующих шарнирах механизма станка

Максимальные значения реакций наблюдаются при углах поворота кривошипа 180° и 360° , их значения показывают ударный тип воздействия.

На основании расчета момента сопротивления можно подобрать оптимальные электродвигатель и редуктор, обеспечивающие необходимые характеристики и запас мощности. Динамический анализ реакций в шарнирах позволит подобрать оптимальные подшипники.

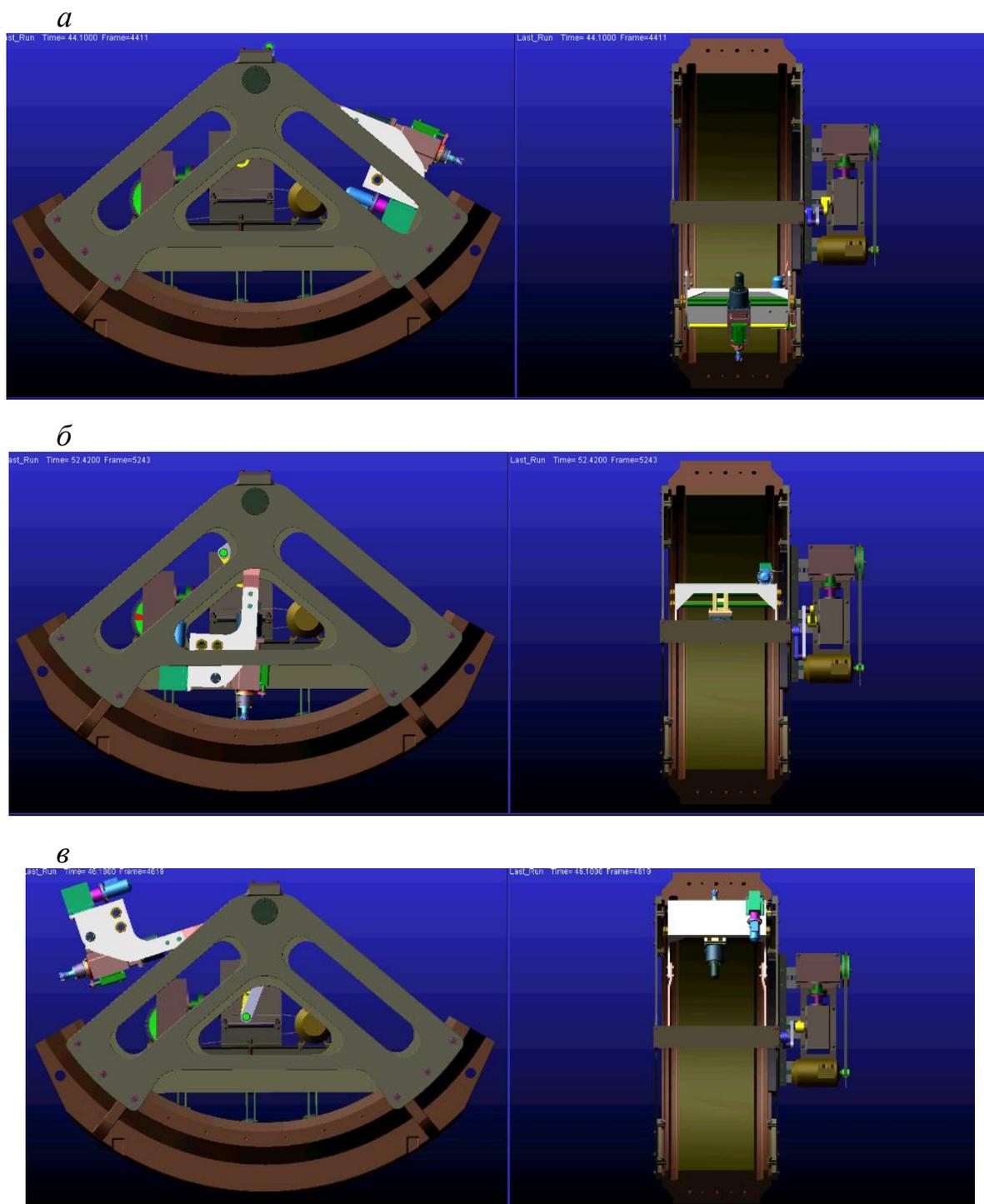


Рис. 3.21. Моделирование кинематики станочного модуля с использованием виртуального прототипа: *a, в* – крайние положения вылета режущего инструмента, *б* – процесс механической обработки

На рис.3.21 представлены результаты моделирования кинематики станочного модуля с использованием объемного виртуального прототипа, что позволяет проверить работоспособность всех механизмов станка, а также исследовать их эксплуатационные характеристики.

С использованием виртуального прототипа получена геометрическая модель обрабатываемой поверхности, позволяющая исследовать параметры качества обработки при различных кинематических параметрах.

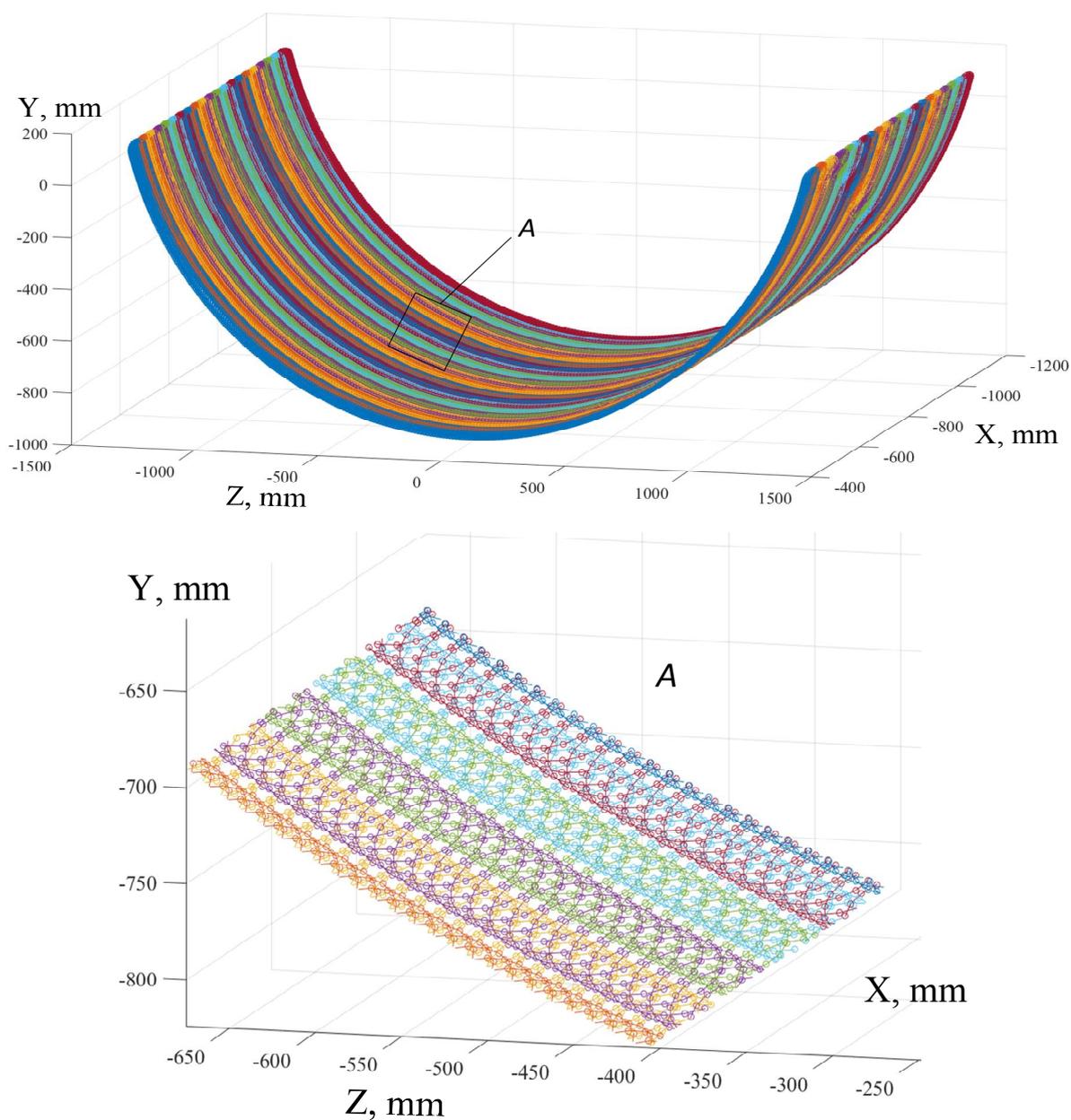


Рис. 3.21. Геометрическая модель формирования обрабатываемой поверхности

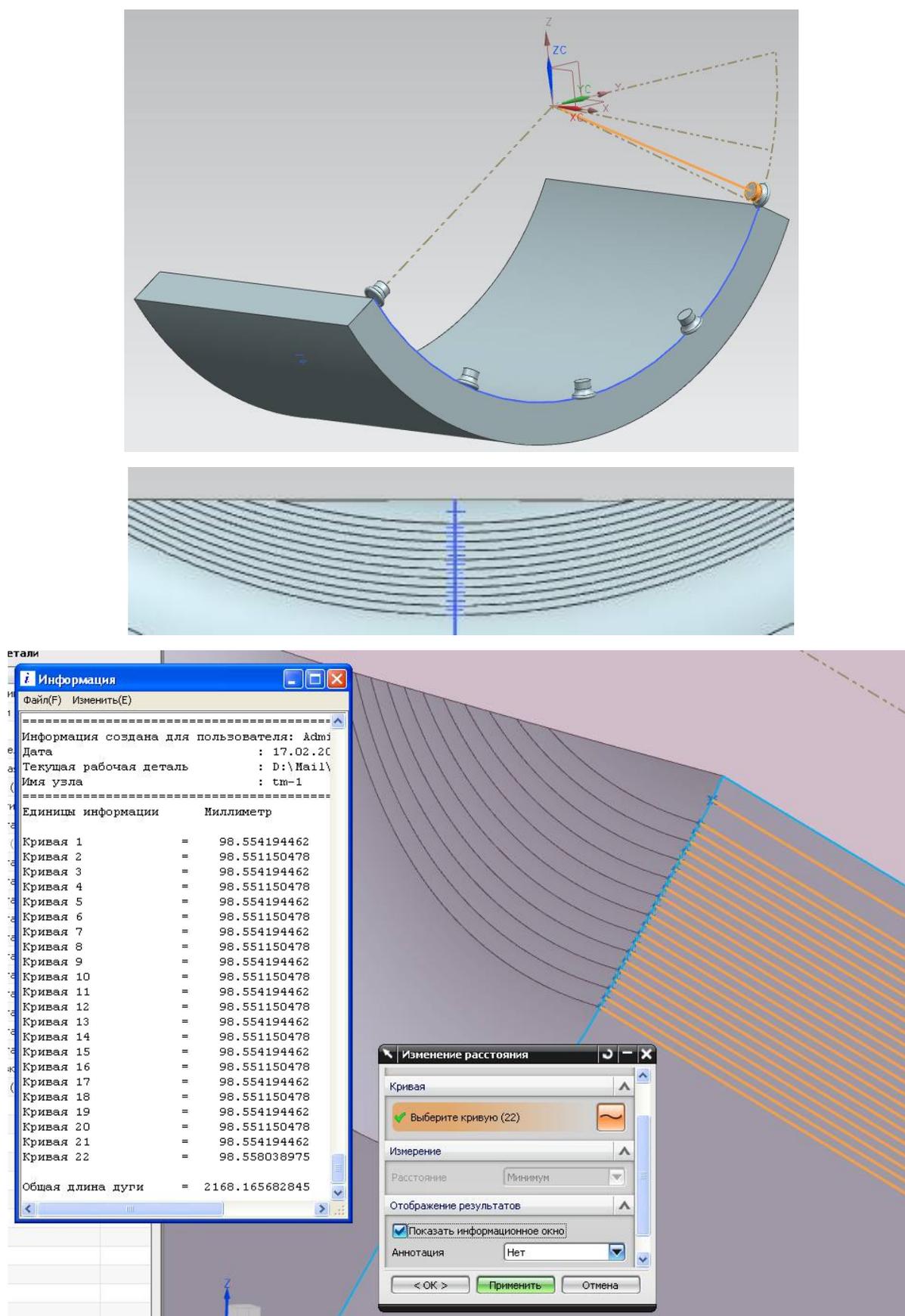


Рис. 3.22. Расчетная модель формообразующего движения режущей кромки инструмента в среде NX

Расчетная модель формообразующего движения режущей кромки инструмента (рис.3.22), реализованная в среде NX позволила проверить обеспечение требуемого качества обрабатываемой поверхности с точки зрения возможного «подрезания» поверхности в связи с обработкой радиальной поверхности методом фрезерования. Проведенные расчеты свидетельствуют, что получаемая погрешность составляет около 3 мкм, то есть соизмерима с величиной шероховатости поверхности.

3.5. Результаты и выводы

1. Разработанная конструкция специального станочного модуля, позволяет заменить непроизводительный ручной труд при ремонтной обработке опорной поверхности скольжения крупногабаритных подшипников на механический, что значительно снизит время обработки, повысит стабильность качества обработанной поверхности.

2. Предложенная расчетная методика структурного и кинематического анализа исполнительного механизма станочного модуля для обработки опорной поверхности крупногабаритных подшипников позволяет конструктивно предусмотреть необходимые технологические параметры механической обработки, обеспечивающие заданное качество обрабатываемой поверхности.

3. Моделирование процесса работы станочного модуля в среде MSC Adams с использованием имитационной модели и виртуального прототипа позволило выполнить кинематический и динамический анализ механизма, определить силомоментные характеристики, проверить работоспособность узлов и механизмов. Полученные результаты расчета момента сопротивления позволяют обосновать выбор электропривода и редуктора с учетом необходимого запаса по мощности, а динамические реакции в шарнирах – выбор подшипников.

ГЛАВА 4. ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ОБРАБОТКИ ОПОРНОЙ ПОВЕРХНОСТИ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ПОДШИПНИКОВ

В предшествующих главах разработаны структурная, компоновочная и кинематическая схемы специального оборудования для обработки крупногабаритных подшипников, исследованы технологические параметры и условия обработки при фрезеровании баббитов. Однако для эффективного использования предложенного оборудования необходимо оптимизировать технологические параметры с целью обеспечения его максимальной производительности при обеспечении заданных параметров качества обработки.

4.1. Разработка оптимизационного алгоритма

На основании результатов исследований, полученных во второй главе необходимо определить оптимальное сочетание технологических параметров, обеспечивающее максимальную производительность процесса при заданной шероховатости поверхности, требуемой стойкости инструмента и допустимой мощности привода главного движения.

В качестве оптимизируемых параметров примем подачу на зуб и скорость резания, так как именно эти параметры оказывают наибольшее влияние на производительность обработки, кроме того, подача оказывает существенное влияние на шероховатость поверхности и мощность резания, а скорость резания определяет стойкость инструмента. На рис. 4.1 представлена структурная схема оптимизации. Входными параметрами будут являться условия резания (марка обрабатываемого материала, диаметр фрезы, количество зубьев, ширина фрезерования, глубина резания) и конструктивные параметры обрабатываемого сегмента подшипника (диаметр и ширина), оказывающие влияние на общую длину обработки на одном переходе. В качестве технических ограничений приняты: допустимая температура резания, заданная шероховатость, которую необходимо

обеспечить на выполняемом переходе, мощность привода главного движения, заданная стойкость инструмента. Выходные параметры – время обработки, эффективная мощность резания, фактическая температура резания.

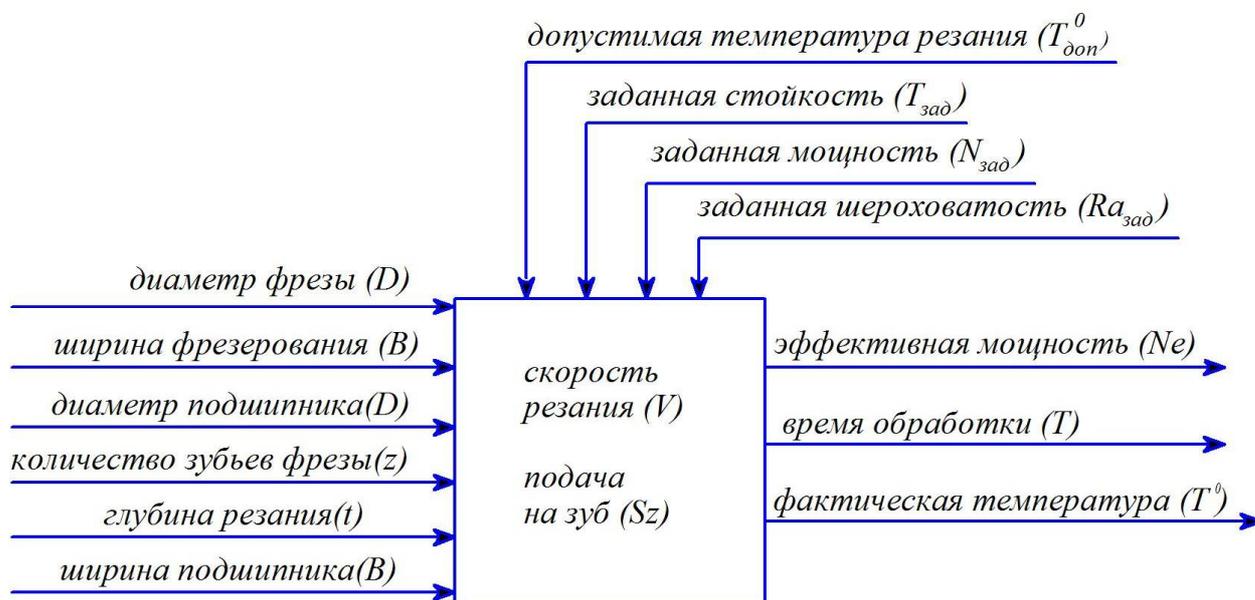


Рис. 4.1. Структурная схема оптимизации

На рис. 4.2 представлен оптимизационный алгоритм, состоящий из двух основных этапов. После того, как определены исходные данные и заданы технологические ограничения, на первом этапе выполняется решение основной оптимизационной задачи при установленных ограничениях, без учета ограничения по шероховатости поверхности. В качестве ограничений выступают: заданная стойкость инструмента, допустимая температура и мощность резания. В качестве выходных параметров получаем значения оптимизируемых режимов, обеспечивающих установленные ограничения. На втором этапе выполняется корректировка полученных значений с учетом ограничения по шероховатости поверхности, фиксируется полученная при оптимизации скорость резания, так как она не оказывает существенного влияния на величину шероховатости. Требуемое значение шероховатости поверхности обеспечивается за счет корректировки подачи методом итерационного приближения. Второй этап необходим, так как функция

шероховатости поверхности от технологических параметров, разработанная в п.2.5, является функцией второго порядка, имеет квадратичные и парные члены, поэтому сложно линейризуется, в отличие от других ограничений, заданных степенными функциями.



Рис. 4.2. Оптимизационный алгоритм

4.2. Разработка оптимизационной модели

В качестве основного метода оптимизации примем метод линейного программирования.

Оптимизация технологических режимов заключается в установлении математических зависимостей, которые ставят в зависимость оптимизируемые параметры через систему технологических ограничений от целевой функции.

Установим ограничение мощности резания, которое связывает эффективную мощность процесса резания с оптимизируемыми параметрами (подачей и скоростью резания). Математически мощность резания рассчитывается по формуле [8];

$$Ne = \frac{Pz \cdot V}{1020 \cdot 60} \quad , \quad 4.1$$

где Pz – тангенциальная составляющая силы резания, Н, V – скорость резания, м/мин.

В качестве функции тангенциальной составляющей силы резания примем, разработанную во второй главе по результатам эксперимента (параграф 2.2):

$$Pz = 336 \frac{t^{0,85} \cdot Sz^{0,75} \cdot B^1}{n^{0,1} \cdot D^{0,8}} \quad . \quad 4.2$$

Скорость резания выразим через частоту вращения:

$$V = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \quad . \quad 4.3$$

Преобразуем выражение 4.1 с учетом 4.2 и 4.3, получаем:

$$Ne = \frac{336 \cdot t^{0,85} \cdot Sz^{0,75} \cdot B \cdot \pi \cdot D \cdot n}{1020 \cdot 60 \cdot D^{0,8} \cdot n^{0,1} \cdot 1000} \quad , \quad 4.4$$

после упрощения:

$$Ne = 1,72 \cdot 10^{-5} \cdot t^{0,85} \cdot Sz^{0,75} \cdot B \cdot D^{0,2} \cdot n^{0,9} \quad . \quad 4.5$$

Для получения технического ограничения в виде линейной функции необходимо вынести Sz и n в левую часть выражения:

$$Sz^{0,75} \cdot n^{0,9} = \frac{Ne}{1,72 \cdot 10^{-5} \cdot t^{0,85} \cdot B \cdot D^{0,2}} \quad 4.6$$

Прологарифмируем данное уравнение, чтобы привести его к линейному виду. В связи с тем, что подача является малой величиной, домножим её значение на 100 для получения логарифмов величин одного порядка, результатом преобразований будет являться выражение:

$$(100 \cdot Sz)^{0,75} \cdot n^{0,9} = \frac{Ne \cdot 100^{0,75}}{1,72 \cdot 10^{-5} \cdot t^{0,85} \cdot B \cdot D^{0,2}} \quad 4.7$$

Для линеаризации полученного равенства прологарифмируем его:

$$0,75 \ln(100 \cdot Sz) + 0,9 \ln(n) = \ln\left(\frac{Ne \cdot 100^{0,75}}{1,72 \cdot 10^{-5} \cdot t^{0,85} \cdot B \cdot D^{0,2}}\right) \quad 4.8$$

Введем обозначения:

$$\ln(100Sz) = x_1, \quad \ln(n) = x_2 \quad 4.9$$

$$\ln\left(\frac{Ne \cdot 100^{0,75}}{1,72 \cdot 10^{-5} \cdot t^{0,85} \cdot B \cdot z \cdot D^{0,2}}\right) = b_1 \quad 4.10$$

В результате получаем линейное неравенство, которое является ограничением, связывающим скорость резания и подачу с эффективной мощностью резания:

С учетом обозначений выражение 4.8 примет вид:

$$0,75 \cdot x_1 + 0,9 \cdot x_2 \leq b_1 \quad 4.11$$

Также необходимо учесть стойкость режущего инструмента. Для это введем ограничение по стойкости инструмента, которая будет выражаться через допустимую скорость резания:

$$V = \frac{Cv \cdot D^q}{T^m \cdot t^x \cdot Sz^y \cdot B^u \cdot z^p} \quad 4.12$$

$$V = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \quad 4.13$$

Коэффициенты равны:

$$C_v=155; x=0,2; y=0,4; u=0,15; q=0,25; m=0,2; p=0,1.$$

Приравняем выражения 4.12 и 4.13, вынесем s и n в левую часть, умножим s на 100 и прологарифмируем полученное выражение. Результатом наших действий будет выражение:

$$0,4 \ln(100 \cdot Sz) + \ln(n) = \ln\left(\frac{3,092 \cdot 10^5}{D^{0,75} \cdot T^{0,2} \cdot t^{0,1} \cdot B^{0,15} \cdot z^{0,1}}\right) \quad 4.14$$

Обозначив $\ln(100Sz)=x_1$, $\ln(n)=x_2$, логарифм правой части уравнения - b_2 , запишем техническое ограничение, устанавливающее связь между заданной стойкостью инструмента и оптимизируемыми параметрами:

$$0,4 \cdot x_1 + x_2 \leq b_2 \quad 4.15$$

Введем ограничение по времени обработки. Данное ограничение будет связывать период стойкости фрезы и время в процессе работы на одном технологическом переходе.

Время, необходимое для выполнения одного прохода:

$$T = \frac{H \cdot L}{S_{\min} \cdot B} \quad 4.16$$

где H – ширина вкладыша, мм; L – длина сектора вкладыша по радиусной поверхности, мм; S_{\min} – минутная подача инструмента, мм/мин; B – ширина фрезерования, мм.

$$S_{\min} = Sz \cdot z \cdot n \quad 4.17$$

где Sz – подача на зуб, мм/зуб; z – количество зубьев фрезы; n – частота вращения фрезы, мин^{-1} .

$$T = \frac{H \cdot L}{Sz \cdot z \cdot n \cdot B} \quad 4.18$$

отсюда следует:

$$Sz \cdot n = \frac{H \cdot L}{T \cdot z \cdot B} \quad 4.19$$

Домножим Sz на 100 и прологарифмируем полученное выражение:

$$\ln(100 \cdot Sz) + \ln(n) = \ln\left(\frac{H \cdot L \cdot 100}{T \cdot z \cdot B}\right) \quad 4.20$$

Обозначим

$$\ln(100Sz) = x_1, \quad \ln(n) = x_2, \quad \ln\left(\frac{H \cdot L \cdot 100}{T \cdot z \cdot B}\right) = b_3, \quad 4.21$$

получим третье техническое ограничение при фрезеровании баббита.

$$x_1 + x_2 \geq b_3 \quad 4.22$$

Ограничение по температуре резания вводится с целью контроля температуры в пределах допустимых значений и предотвращения таких негативных явлений, как наростообразование. В качестве функций температуры резания использованы эмпирические зависимости, полученные при проведении экспериментальных исследований (глава 2).

Температура в зоне резания при фрезеровании баббита марки Б16:

$$Tr = 4,22 \frac{t^{0,29} \cdot Sz^{0,5} \cdot B \cdot n^{0,6}}{D^{1,08}}, \quad 4.23$$

температура в зоне резания при фрезеровании баббита марки Б83:

$$Tr = 33 \frac{t^{0,47} \cdot Sz^{0,57} \cdot B^{0,95} \cdot n^{0,38}}{D}, \quad 4.24$$

где t – глубина фрезерования, Sz – подача на зуб, B – ширина фрезерования, D – диаметр фрезы и n – частота вращения фрезы.

Из равенств 4.23 и 4.24 следует для баббита марки Б16:

$$Sz^{0,5} \cdot n^{0,6} = \frac{Tr \cdot D^{1,08}}{4,22 \cdot t^{0,29} \cdot B}, \quad 4.25$$

для баббита марки Б83:

$$Sz^{0,57} \cdot n^{0,38} = \frac{Tr \cdot D}{33 \cdot t^{0,47} \cdot B^{0,95}} \quad 4.26$$

Приведем полученные неравенства к к линейному виду логарифмированием, для этого домножим подачу на 100 для получения логарифмов величин одного порядка, результатом преобразований будут выражения:

для баббита марки Б16

$$0,5 \cdot \ln(100 \cdot Sz) + 0,6 \cdot \ln(n) = \ln\left(\frac{Tr \cdot D^{1,08} \cdot 100^{0,5}}{4,22 \cdot t^{0,29} \cdot B}\right), \quad 4.27$$

для баббита марки Б83

$$0,57 \cdot \ln(100 \cdot Sz) + 0,38 \cdot \ln(n) = \ln\left(\frac{Tr \cdot D \cdot 100^{0,57}}{33 \cdot t^{0,47} \cdot B^{0,95}}\right). \quad 4.28$$

Обозначим

$$\ln(100Sz) = x_1 \quad \ln(n) = x_2$$

для баббита марки Б16

$$\ln\left(\frac{Tr \cdot D^{1,08} \cdot 100^{0,5}}{4,22 \cdot t^{0,29} \cdot B}\right) = b_4,$$

для баббита марки Б83

$$\ln\left(\frac{Tr \cdot D \cdot 100^{0,57}}{33 \cdot t^{0,47} \cdot B^{0,95}}\right) = b_4$$

Запишем техническое ограничение, устанавливающее связь между температурой в зоне резания и оптимизируемыми параметрами:

для баббита марки Б16

$$0,5 \cdot x_1 + 0,6 \cdot x_2 \leq b_4, \quad 4.29$$

для баббита марки Б83

$$0,57 \cdot x_1 + 0,38 \cdot x_2 \leq b_4. \quad 4.30$$

Ограничения по предельным значениям оптимизируемых параметров в логарифмической форме имеют вид:

$$\ln(Sz_{\min} \cdot 100) \leq x_1 \leq \ln(Sz_{\max} \cdot 100), \quad 4.31$$

$$\ln(n_{\min}) \leq x_2 \leq \ln(n_{\max}) \quad 4.32$$

Полученные неравенства 4.11, 4.15, 4.22 и 4.29 (4.30), а также ограничения по предельным значениям оптимизируемых параметров в логарифмической форме 4.31 и 4.32 образуют систему ограничений.

Система ограничений для баббита марки Б16:

$$\begin{cases} 0,75 \cdot x_1 + 0,9 \cdot x_2 \leq b_1 \\ 0,4 \cdot x_1 + x_2 \leq b_2 \\ x_1 + x_2 \geq b_3 \\ 0,5 \cdot x_1 + 0,6 \cdot x_2 \leq b_4 \\ \ln(Sz_{\min} \cdot 100) \leq x_1 \leq \ln(Sz_{\max} \cdot 100) \\ \ln(n_{\min}) \leq x_2 \leq \ln(n_{\max}) \end{cases} \quad 4.33$$

Система ограничений для баббита марки Б83:

$$\begin{cases} 0,75 \cdot x_1 + 0,9 \cdot x_2 \leq b_1 \\ 0,4 \cdot x_1 + x_2 \leq b_2 \\ x_1 + x_2 \geq b_3 \\ 0,57 \cdot x_1 + 0,38 \cdot x_2 \leq b_4 \\ \ln(Sz_{\min} \cdot 100) \leq x_1 \leq \ln(Sz_{\max} \cdot 100) \\ \ln(n_{\min}) \leq x_2 \leq \ln(n_{\max}) \end{cases} \quad 4.34$$

Целевая функция имеет вид:

$$f(x_1, x_2) = x_1 + x_2 \rightarrow \max \quad 4.35$$

Шероховатость поверхности не входит в данную систему ограничений (4.33 и 4.34) в связи с тем, что функция шероховатости – это функция второго порядка, которая имеет квадратные и парные члены и приведение её к линейному виду не представляется возможным. Данный факт говорит о необходимости 2 ступеней оптимизационного алгоритма (рис. 4.2).

Одним важных исходных данных процесса оптимизации является назначение величины критической температуры резания. Примем данную величину из условия минимизации процесса наростообразования. Известно, что при уменьшении твердости обрабатываемого материала процессы

наростообразования интенсифицируются. Так, исследования, проведенные в Карагандинском государственном техническом университете, показали, что снижение твердости обрабатываемого материала менее 140 НВ резко увеличивает нарост (рис 4.3). Кроме того, снижение твердости увеличивает величину скорости резания, при которой наростообразование прекращается.

При твердости менее 140 НВ скорость резания должна составлять более 80 м/мин, что в свою очередь оказывает влияние на стойкость инструмента.

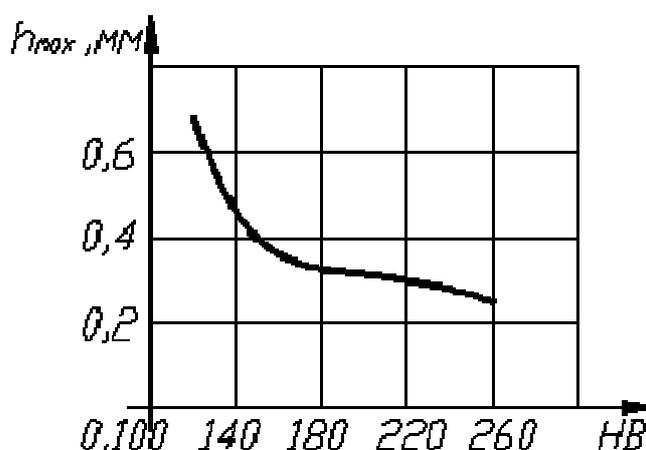


Рис. 4.3. Влияние твердости обрабатываемого материала на величину максимального нароста

Твердость баббита с увеличением температуры существенно снижается. Так, уже при температуре 100°C твердость баббита снижается вдвое (табл.1.6 параграфа 1.2): с 299 до 145 МПа (для баббита Б83) и с 295 до 150 (для баббита Б16).

Примем критическую величину температуры резания 105°C, что будет соответствовать твердости баббита примерно 140 НВ и обеспечит благоприятные условия наростообразования при скорости резания не менее 90 м/мин.

4.3. Результаты реализации оптимизационного алгоритма и оптимизационной модели

Реализуем разработанный оптимизационный алгоритм и оптимизационную модель на конкретном примере оптимизации режимов резания одного из типоразмеров крупногабаритных подшипников.

1. Задаем исходные данные и условия обработки:

- обрабатываемый материал – баббит Б16;
- вид обработки – черновое фрезерование;
- глубина резания – 3 мм;
- диаметр фрезы – 40 мм;
- количество зубьев фрезы – 3;
- ширина фрезерования – 32 мм;
- диаметр обрабатываемого подшипника – 800 мм;
- ширина обрабатываемого подшипника – 370 мм;

2. Задаем технические (технологические) ограничения:

- стойкость инструмента – 160 мин;
- мощность привода главного движения – 0,5 кВт;
- шероховатость поверхности – $Ra_{8,5}$;
- допустимая температура резания – 105°C;

3. Задаем диапазоны изменения оптимизируемых параметров: частота вращения фрезы $n_{\min}=500$ мм/об, $n_{\max}=1250$ мм/об, подача на зуб $s_{\min}=0,05$ мм/зуб, $s_{\max}=0,25$ мм/зуб.

4. Решаем оптимизационную задачу в заданном диапазоне изменения оптимизируемых параметров с учетом технологических ограничений, максимизируем целевую функцию. Графическое отображение результатов оптимизации представлено на рис.4.4.

Область допустимых решений лежит внутри замкнутого многогранника, образованного пересечением установленных ограничений. Так как в исходных данных принят один из меньших типоразмеров

подшипника, ограничение по времени обработки не участвует в решении, все значения в принятом диапазоне ему удовлетворяют. Лимитирующими ограничениями являются ограничение по скорости резания, соответствующей заданной стойкости инструмента и температуре резания: оптимум расположен на пересечении этих ограничений с верхним пределом подачи. Оптимальными значениями являются: $X_1=3,219$ и $X_2=6,84$, что соответствует следующим натуральным значениям оптимизируемых параметров: подача на зуб 0,25 мм/зуб, частота вращения 934 об/мин, скорость резания 117 м/мин.

Полученные значения обеспечивают максимальную производительность с учетом заданных ограничений, при этом лимитирующие принимают максимальные значения: скорость резания 117 м/мин максимально допустимая для обеспечения стойкости 160 мин и максимально допустимая температура резания 105°C.

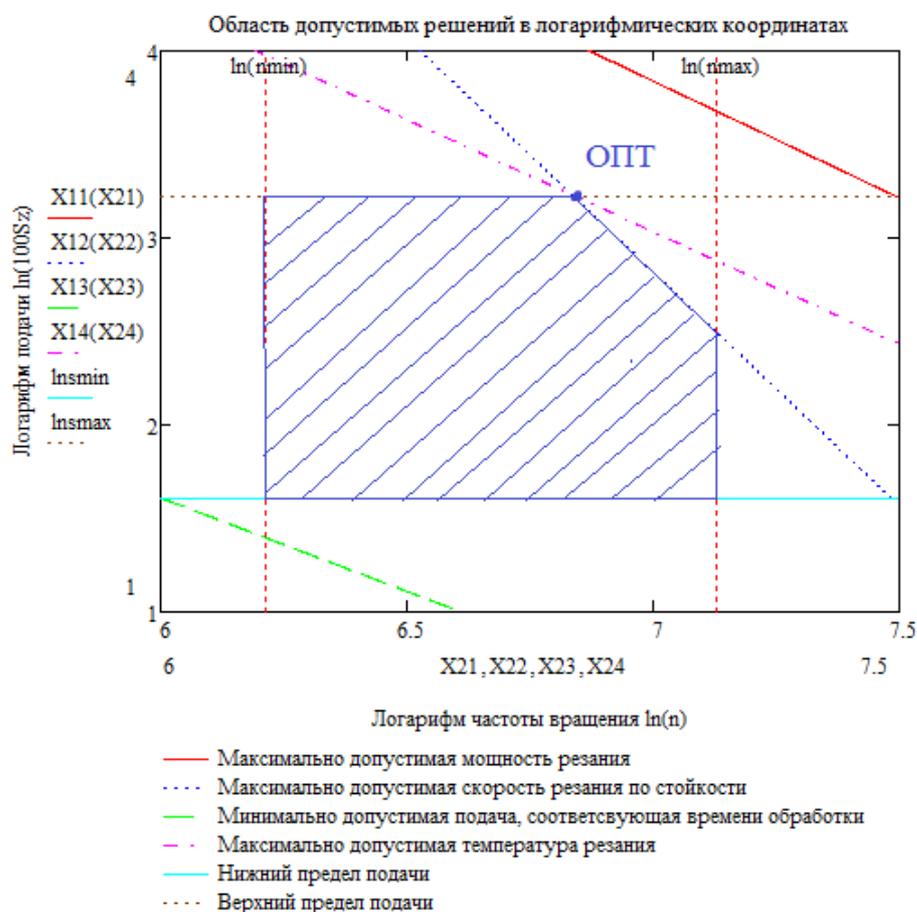


Рис. 4.4. Графическое представление оптимизации, баббит Б16

5. Корректируем полученные значения с точки зрения обеспечения требуемой шероховатости поверхности. Так как скорость резания практически не оказывает влияние на шероховатость поверхности, принимаем ее значение равным оптимальному, определенному на предшествующем этапе. Обеспечиваем требуемую шероховатость за счет уменьшения значения подачи итерационным методом. С учетом корректировки оптимальным значением является подача на зуб 0,25 мм/зуб.

6. Определяем фактические значения условий резания с учетом корректировки подачи на предшествующем этапе:

- получаемая шероховатость поверхности – $Ra_{8,5}$;
- температура резания – 104°C ;
- эффективная мощность – 0,482 кВт;
- время обработки – 14 мин.

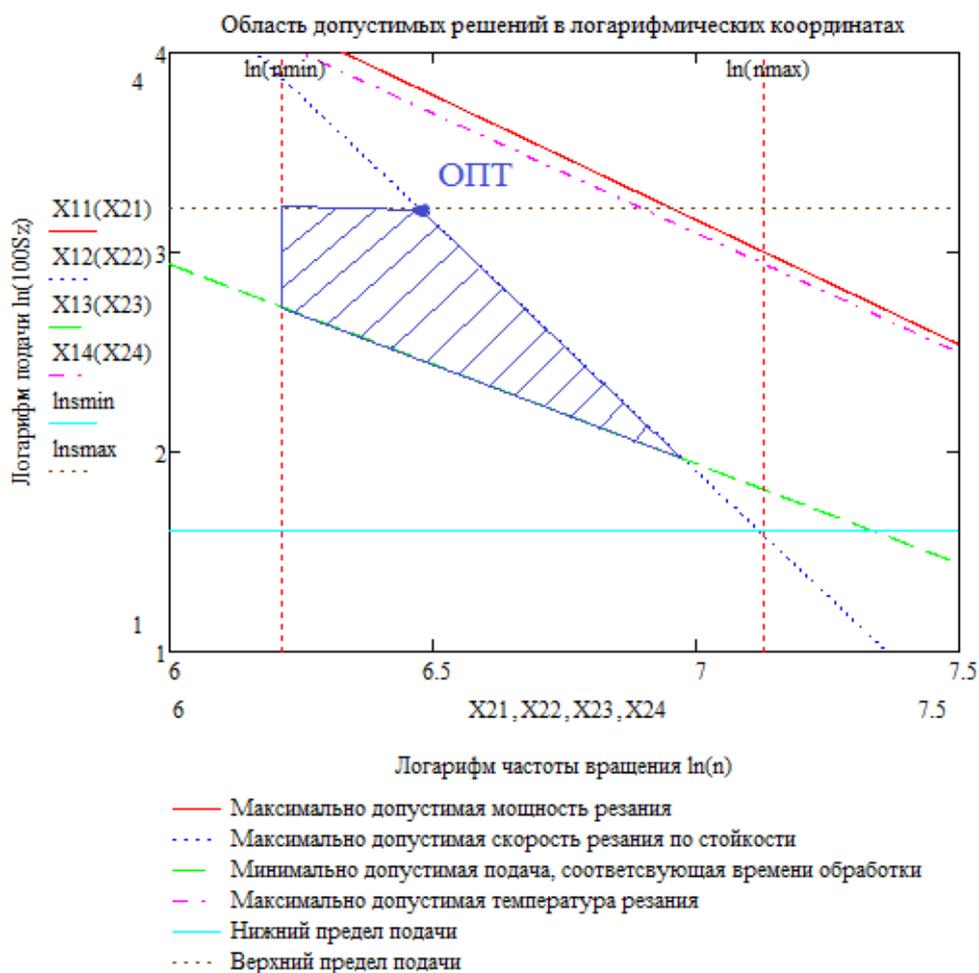


Рис. 4.5. Графическое представление оптимизации, баббит В16

Рассмотрим особенности реализации оптимизационного алгоритма для других характерных случаев обработки.

На рис.4.5 представлена область допустимых решений при обработке подшипника диаметром 2100 мм и шириной 800 мм, диаметр фрезы 60 мм, глубина резания 3 мм.

Для больших типоразмеров подшипников ограничение по времени обработки более существенно. Лимитирующим ограничением является допустимая скорость резания, соответствующая заданной стойкости инструмента, оптимум, так же как и в предыдущем случае пересекает верхнюю границу предельного значения подачи (0,25 мм/зуб), частота вращения 649 об/мин, скорость резания 122 м/мин.

На рис. 4.6 представлена область допустимых решений при обработке баббита Б83, параметры подшипника: диаметр 800 мм, ширина 370 мм, диаметр фрезы 40 мм, глубина резания 2 мм.

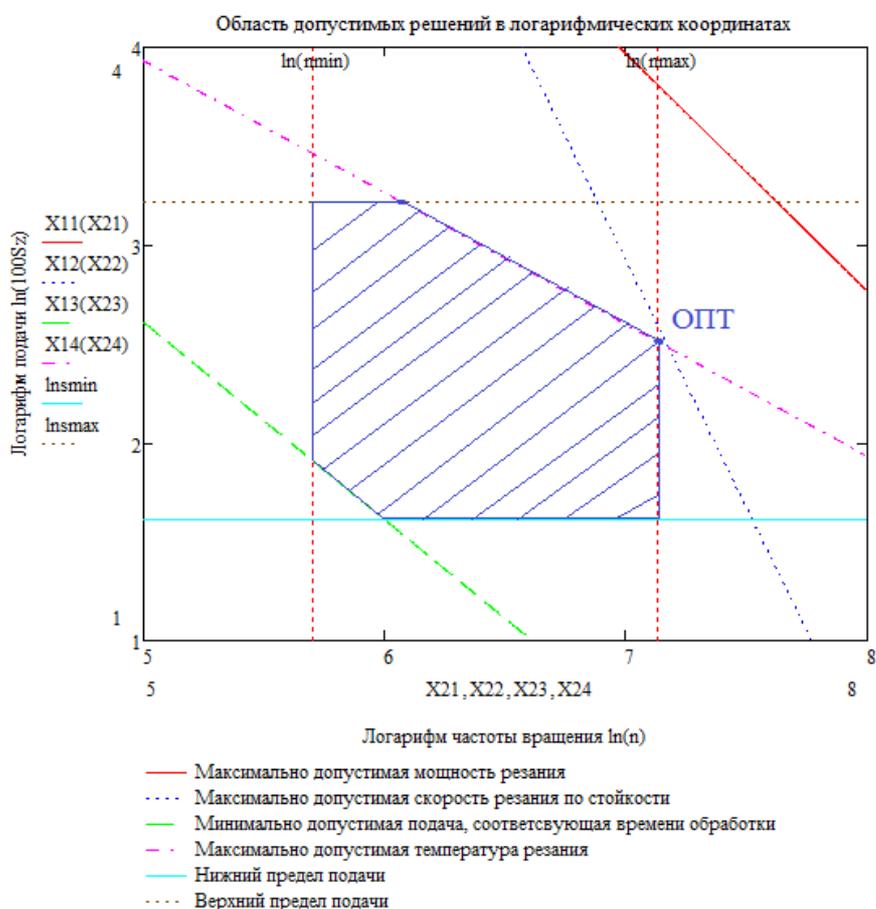


Рис. 4.6. Графическое представление оптимизации, баббит Б83

Лимитирующим ограничением является допустимая температура резания. В отличие от обработки баббита Б16, обработка баббита Б83 характеризуется меньшими значениями подачи и большими значениями скорости резания, что связано с характером формирования температуры резания. Оптимальные значения: подача (0,07 мм/зуб), частота вращения 1250 об/мин, скорость резания 157 м/мин.

На рис. 4.7 представлена область допустимых решений при обработке баббита Б83, параметры подшипника: диаметр 2400 мм, ширина 850 мм, диаметр фрезы 60 мм, глубина резания 1 мм.

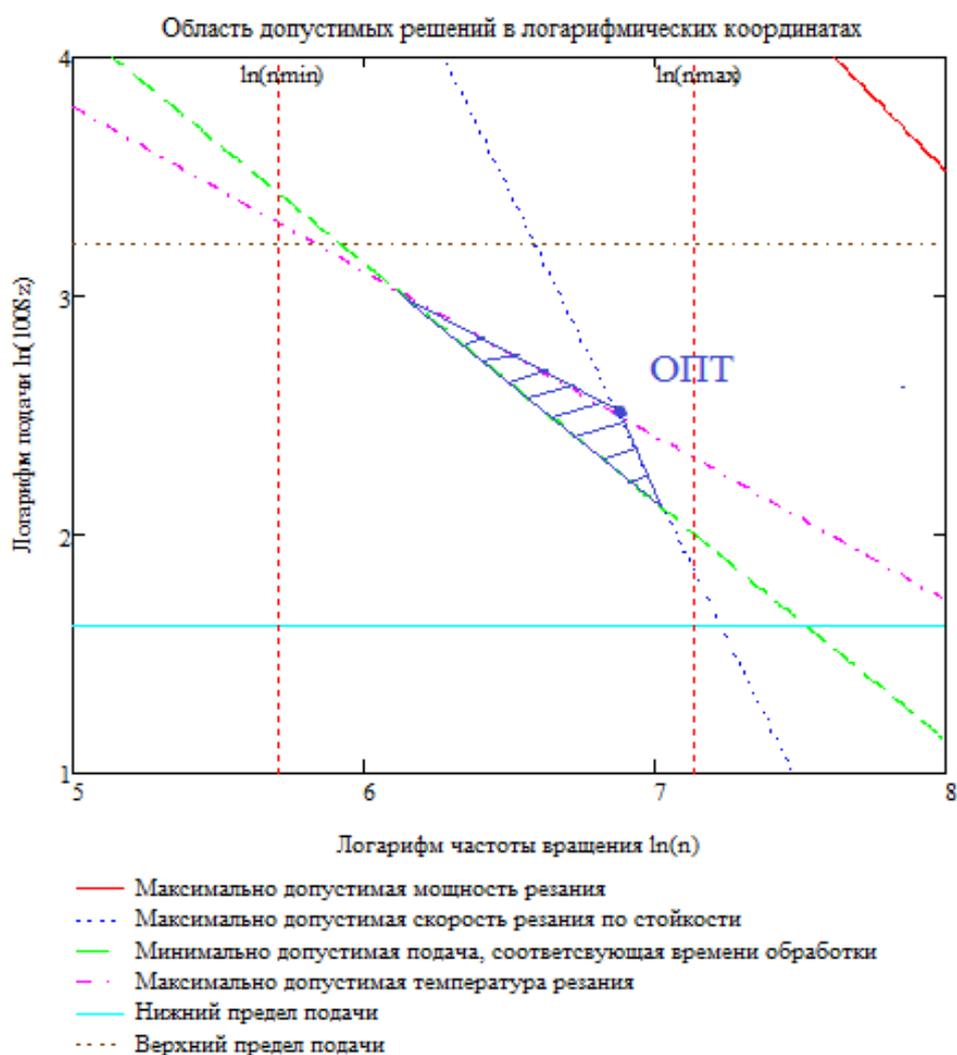


Рис. 4.7. Графическое представление оптимизации, баббит Б83

Оптимум лежит на пресечении ограничения по температуре и скорости резания. Оптимальные значения: подача 0,18 мм/зуб, частота вращения 826

об/мин, скорость резания 156 м/мин. После корректировки в соответствии с заданной шероховатостью $Ra_{3,2}$ подача 0,124 мм/зуб.

При увеличении глубины резания до 3 мм, область допустимых решений лежит в очень узкой области (рис. 4.8).

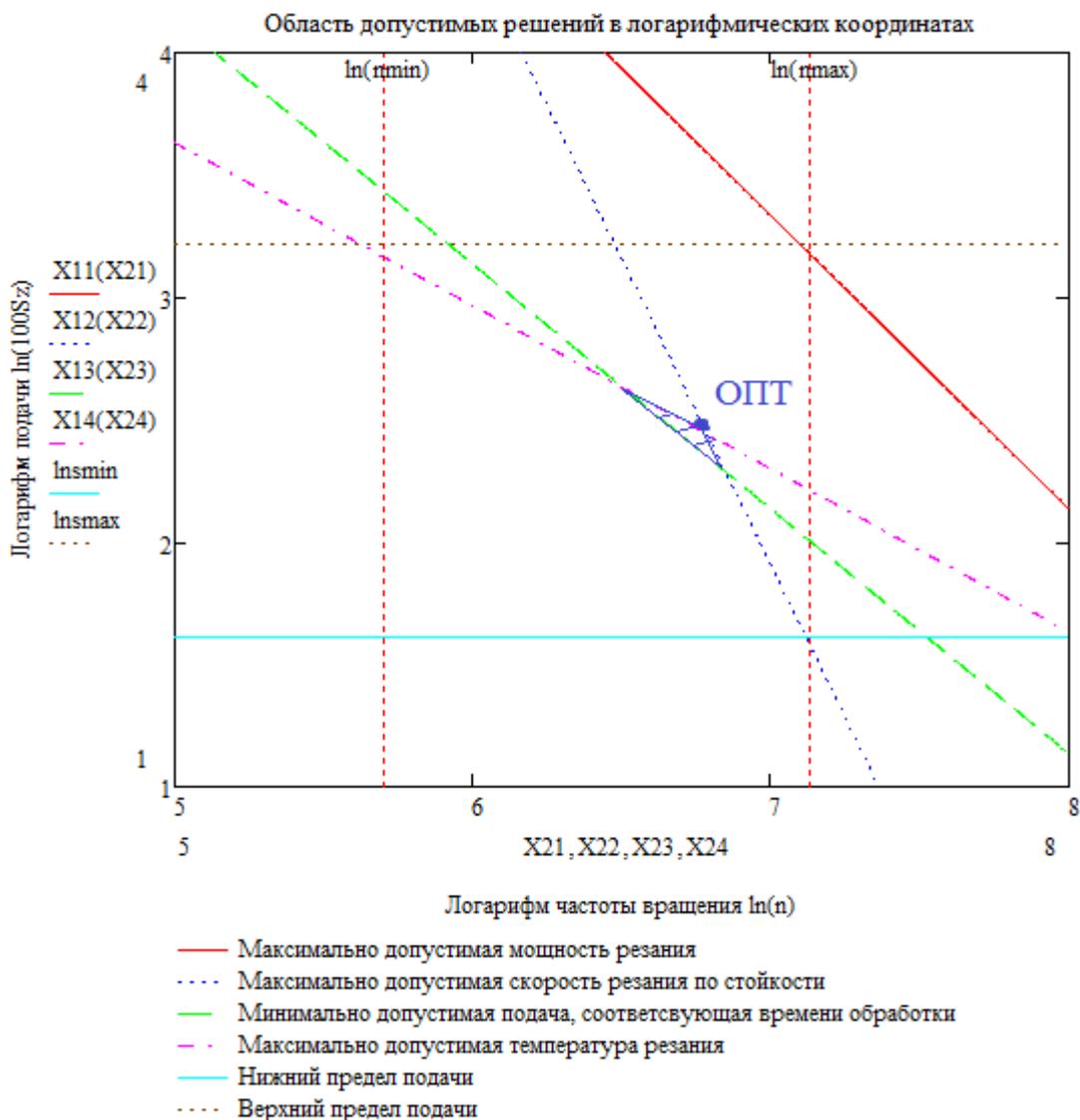


Рис. 4.8. Графическое представление оптимизации, баббит Б83

Аналогичным образом с использованием разработанных оптимизационного алгоритма и оптимизационной модели выполнена оптимизация режимов резания для ряда типоразмеров крупногабаритных подшипников, результаты представлены в табл.4.1.

Таблица 4.1

Результаты оптимизации режимов обработки для различных типоразмеров
подшипников с вкладышем из баббита Б16

№	Параметры подшипника, мм			Переход	Глубина резания, t , мм	Ra , мкм	Скорость резания, м/мин		Подача на зуб, s , 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.						
1	800	370	838	черновой	3	8,5	117	118	0,245	934	251	0,482	104	14,1
				получист.	2	6,3	122	122	0,251	973	181	0,361	96	13,3
				чистовой	1	3,2	131	161	0,149	1043	67	0,144	63	20,8
2	1200	770	1257	черновой	3	8,5	117	118	0,245	934	251	0,482	104	44
				получист.	2	6,3	122	122	0,251	973	181	0,361	96	41,3
				чистовой	1	3,2	131	161	0,149	1043	67	0,144	63	65
3	1400	550	1466	черновой	3	8,5	120	121	0,244	764	267	0,524	90	36
				получист.	2	6,3	125	125	0,25	796	192	0,392	83	34
				чистовой	1	3,2	134	165	0,148	853	71	0,156	54	53
4	1400	860	1466	черновой	3	8,5	120	121	0,244	764	267	0,524	90	56
				получист.	2	6,3	125	125	0,25	796	192	0,392	83	53
				чистовой	1	3,2	134	165	0,148	853	71	0,156	54	83
5	1800	1000	1885	черновой	3	8,5	120	121	0,244	764	267	0,524	90	84
				получист.	2	6,3	125	125	0,25	796	192	0,392	83	79
				чистовой	1	3,2	134	165	0,148	853	71	0,156	54	124

6	2100	800	2199	черновой	3	8,5	122	123	0,243	649	281	0,561	80	78
				получист.	2	6,3	127	127	0,248	675	201	0,419	74	73
				чистовой	1	3,2	136	169	0,146	724	75	0,166	48	115
7	2400	850	2513	черновой	3	8,5	122	123	0,243	649	281	0,561	80	94
				получист.	2	6,3	127	127	0,248	675	201	0,419	74	89
				чистовой	1	3,2	136	169	0,146	724	75	0,166	48	140
8	2700	700	2827	черновой	3	8,5	122	123	0,243	649	281	0,561	80	87
				получист.	2	6,3	127	127	0,248	675	201	0,419	74	82
				чистовой	1	3,2	136	169	0,146	724	75	0,166	48	130

Таблица 4.2

Результаты оптимизации режимов обработки для различных типоразмеров
подшипников с вкладышем из баббита Б83

№	Параметры подшипника, мм			Переход	Глубина резания, t , мм	Ra , мкм	Скорость резания, м/мин		Подача на зуб, s , 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.						
1	800	370	838	черновой	3	5,8	157	178	0,088	1250	113	0,291	140	29
				получист.	2	3,6	157	162	0,123	1250	103	0,265	140	21
				чистовой	1	3,2	132	167	0,135	1052	63	0,135	100	23
2	1200	770	1257	черновой	3	5,8	157	178	0,088	1250	113	0,291	140	92
				получист.	2	3,6	157	162	0,123	1250	103	0,265	140	66
				чистовой	1	3,2	132	167	0,135	1052	63	0,135	100	71

3	1400	550	1466	черновой	3	7,1	175	175	0,097	1117	130	0,371	140	62
				получист.	2	4,5	154	154	0,147	983	127	0,319	140	46
				чистой	1	3,2	133	172	0,135	853	67	0,146	91	58
4	1400	860	1466	черновой	3	7,1	175	175	0,097	1117	130	0,371	140	97
				получист.	2	4,5	154	154	0,147	983	127	0,319	140	73
				чистой	1	3,2	133	172	0,135	853	67	0,146	91	91
5	1800	1000	1885	черновой	3	7,1	175	175	0,097	1117	130	0,371	140	144
				получист.	2	4,5	154	154	0,147	983	127	0,319	140	109
				чистой	1	3,2	133	172	0,135	853	67	0,146	91	136
6	2100	800	2199	черновой	3	7,2	167	167	0,115	885	155	0,423	140	121
				получист.	2	5,26	147	147	0,175	779	153	0,366	140	90
				чистой	1	3,2	136	175	0,134	724	70	0,156	84	126
7	2400	850	2513	черновой	3	7,2	167	167	0,115	885	155	0,423	140	146
				получист.	2	5,26	147	147	0,175	779	153	0,366	140	108
				чистой	1	3,2	136	175	0,134	724	70	0,156	84	153
8	2700	700	2827	черновой	3	7,2	167	167	0,115	885	155	0,423	140	135
				получист.	2	5,26	147	147	0,175	779	153	0,366	140	101
				чистой	1	3,2	136	175	0,134	724	70	0,156	84	142

4.4. Расчет показателей экономической эффективности

Внедрение новой технологии обработки баббитовых вкладышей крупногабаритных подшипников скольжения с использованием в качестве метода механической обработки вместо традиционного шабрения фрезерование с применением разработанного специального оборудования обеспечивает решение ряда важных задач:

- повышение производительности процесса ремонтной обработки;
- снижение себестоимости процесса ремонтной обработки;
- стабильное обеспечение параметров качества обрабатываемой поверхности;
- снижение времени простоя на ремонт агрегата в целом.

Рассмотрим подробнее параметры экономической эффективности внедрения новой ремонтной технологии, в расчетах сравнительного анализа в качестве базовой технологии ремонта внутренней поверхности вкладыша крупногабаритных подшипников скольжения примем традиционную ремонтную технологию, используемую в условиях горнорудных предприятий.

Таблица 4.2

Таблица показателей экономической эффективности

№	Параметры подшипника, мм			Время традиционной обработки, мин	Время обработки с исп. ст. модуля, мин	Повышение производительности	Снижение себестоимости, %
	<i>D</i>	<i>B</i>	<i>L</i>				
1	800	370	838	1800	460	3,92	14
2	1200	770	1257	3900	710	5,5	16
3	1400	550	1466	4800	659	6,38	17
4	1400	860	1466	6600	825	8,00	19
5	1800	1000	1885	9000	920	9,79	19
6	2100	800	2199	9300	946	9,83	21
7	2700	695	2827	10080	1020	9,89	23

Как видно из таблицы 4.2 наблюдается значительное повышение производительности при использовании специального приставного

оборудования, которое складывается из большого числа факторов, описанных подробно в приложении 5 данной диссертации.

Время традиционной обработки складывается из времени, необходимого одному рабочему для ремонта и контроля выполненной операции на одном подшипнике скольжения, но на практике ремонт осуществляется группой рабочих от 2 до 5 человек в зависимости от размера подшипника и сменности выполняемых работ. Время обработки с использованием специального станочного модуля включает в себя время, необходимое для установки и сборки станка на обрабатываемой детали, время на настройку и проверку станка, время непосредственной работы станка на каждом переходе, время необходимое на контроль качества выполненной операции и время на разборку и съём специального оборудования с обработанного подшипника.

Значительное повышение производительности достигается за счёт замены низко производительного ручного труда на механизированную обработку с использованием специального оборудования. Повышение производительности тем выше, чем больше подшипник скольжения. Данный факт связан с тем, что при ремонте в подшипниках большого диаметра сложнее выдерживать обрабатываемый размер и при их обработке чаще используются проверочные инструменты непосредственно при снятии припуска, а также с тем, что в связи с большим диаметром вкладыша увеличивается величина припуска и соответственно время на его съём. Для переносного оборудования выполнение одного черного прохода не занимает такого значительного количества времени, как при ручной обработке, что ещё повышает производительность при сравнении этих двух технологий.

Себестоимость обработки зависит от ряда факторов, которые отражают все возникающие издержки при выполнении данных операций. Основными издержками при ручном шабрении являются заработная плата высококвалифицированным рабочим и расходы на механизированный инструмент, остальные издержки не оказывают существенного влияния на

цену ремонта. При ремонтной обработке вкладыша крупногабаритного подшипника скольжения с помощью специального переносного оборудования основными издержками оказывающими влияние на цену ремонта будет себестоимость оборудования, его обслуживание, амортизация, инструмент, а также заработная плата станочника.

4.5. Результаты и выводы

1. Разработанная оптимизационная модель, обеспечивает повышение производительности и снижение себестоимости обработки опорной поверхности крупногабаритных подшипников при стабильном обеспечении качества обрабатываемой поверхности за счет оптимизации технологических режимов специального станочного модуля.

2. Использование специального ремонтного оборудования позволяет повысить производительность ремонтной обработки крупногабаритных подшипников скольжения в 2-5 раз, сократив время ремонтных работ на 9 рабочих дней.

3. Затраты на заработную плату при выполнении ремонтных работ с использованием специального оборудования снижаются в среднем на 40% за счет снижения количества необходимых работников, снижения их уровня квалификации и уменьшения времени выполнения ремонтных работ.

4. Снижение себестоимости ремонта с использованием специального оборудования составляет около 20% за счет снижения цеховых и общезаводских расходов.

5. Балансовая прибыль за счет сокращения времени простоя мельницы при ремонте с использованием специального оборудования увеличивается вследствие увеличения годового фонда рабочего времени мельницы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе изложены новые научно обоснованные технические и технологические решения создания специального станочного модуля и технологии 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.

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.

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.

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

5. Предложены расчетные методики, имитационные модели и виртуальный прототип станочного модуля, с использованием которых выполнен кинематический и динамический анализ узлов и механизмов, определены 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.

7. Опытно-промышленная апробация результатов работы выполнена на ЗАО «Оскольский завод металлургического машиностроения» в рамках программы внедрения специальных технических средств для совершенствования ремонтных работ, что позволило повысить стабильность параметров качества обработки баббита на 10-15% и сократить брак, что подтверждается актом внедрения.

8. Отдельные результаты исследований использованы в учебном процессе на кафедре «Технология машиностроения» ФГБОУ ВО «БГТУ им.В.Г. Шухова» при подготовке инженерно-технических работников по направлению «Машиностроение».

Научные и практические результаты диссертационных исследований рекомендуется применять с целью повышения эффективности при восстановительной и ремонтной обработке крупногабаритных подшипников скольжения по месту их эксплуатации, а также в учебном процессе при подготовке магистров и аспирантов в области машиностроения и повышения квалификации работников машиностроительных предприятий.

Перспективы дальнейшей разработки темы диссертации заключаются в совершенствовании технологии обработки, анализа динамических характеристик узлов, унификации конструктивных элементов, создания ряда типоразмеров станочных модулей с целью обеспечения возможности применения для широкого диапазона крупногабаритных подшипников.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алиев И. И. Асинхронные двигатели в трехфазном и однофазном режимах/И. И. Алиев. – М.: РадиоСофт, 2004. – 128 с.
2. Баранчиков В.И., Тарапанов А.С., Харламов Г.А. Обработка специальных материалов в машиностроении: Справочник. Библиотека технолога. – М.: Машиностроение, 2002. 264 с.
3. Барботько А. И. Резание материалов : учеб. пособие для студентов вузов/А. И. Барботько, А. В. Масленников. – Старый Оскол: ТНТ, 2011. – 432с.
4. Барыкин Н.П., Асланян И.Р. Математическое моделирование режимов поверхностного пластического деформирования для повышения износостойкости подшипников скольжения// Трение и износ. 2001. Т.22, №5. С.496-500.
5. Барыкин Н.П., Асланян И.Р., Садыков Ф.А. Поверхностная пластическая обработка вкладыша подшипника скольжения// Трение и износ. 2000, Т.21, № 6, с. 634-639.
6. Бешевли О.Б, Дуюн Т.А. Влияние технологических параметров на температурный режим и получаемое качество поверхности при фрезеровании баббита. Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова №2 2015 года с 112-117.
7. Бешевли О.Б, Дуюн Т.А. Особенности теплового состояния баббитов при механической обработке. Сборник трудов. Всероссийское совещание заведующих кафедрами материаловедения и технологии материалов. «Междисциплинарные подходы в материаловедении и технологии. Теория и практика». 6-8 октября 2015, БГТУ им. В.Г. Шухова, Белгород
8. Бешевли О.Б. Разработка расчетной схемы оборудования для ремонтной обработки крупногабаритных подшипников скольжения.

Международная научно-практическая конференция «Технические науки в мире: от теории к практике» выпуск II. 10 августа 2015, Ростов-на-Дону.

9. Бешевли О.Б. Оборудование для повышения производительности при ремонте мельниц. Международная научно-практическая конференция «Новая наука: проблемы и перспективы» выпуск II. 4 августа 2015, Стерлитамак.

10. Бешевли О.Б. Альтернативный способ ремонтной обработки крупногабаритных подшипников скольжения. Международная научно-практическая конференция «Проблемы и перспективы технических наук» выпуск II. 10 августа 2015, Уфа.

11. Бешевли О.Б. Повышение качества ремонтной обработки баббитовых вкладышей крупногабаритных подшипников скольжения. Символ науки №8/2015, Уфа.

12. Бешевли О.Б., Чуев К.В. Моделирование теплового состояния баббита в процессе фрезерования. Сборник трудов конференции. VII Международный молодежный форум «Образование, наука, производство» 20-22 октября 2015 БГТУ им. В.Г. Шухова, Белгород

13. Бобровский Н.М., В.А. Вильчик, Бокк В. В., Н. Н. Максименко, П. А. Мельников, М. В. Гомельский, И. Н. Бобровский Патент РФ №2348504. Устройство для обработки поверхностным пластическим деформированием.

14. Бреев С.В. Исследование влияния кинематики процесса фрезерования на деформационные процессы и шероховатость. / Сборник трудов Второй Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов "Будущее машиностроения России" – М: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009, рег. номер ФГУП НТЦ «Информрегистр» №0320901785

15. Бреев С.В. Исследование формирования свойств поверхности детали при фрезеровании./ В.А. Ким, Е.Б. Щелкунов, С.В. Бреев// Технология машиностроения 2011-№7.

16. Валеева А. Х., Валеев И. Ш., Фазлыяхметов Р. Ф., Пшеничнюк А. И. О механизме приработки при испытании на износ баббита Б83. Физика металлов и металловедение, 2015, том 116, № 5, с. 538–540.
17. Власов В. И. Процессы и режимы резания конструкционных материалов : учеб. пособие / В. И. Власов. – М. : ИТО, 2007. – 188 с.
18. Воскресенский В.А., Дьяков В.И. Расчёт и проектирование опор скольжения: Справочник.-М.: Машиностроение, 1980.-224с.
19. Гайдышев И. Анализ и обработка данных : спец. справ. / И. Гайдышев. – СПб. : Питер, 2001. – 752 с.
20. Глебова Е. В. Производственная санитария и гигиена труда : учеб. пособие / Е. В. Глебова. – Изд. 3-е, перераб. и доп. – М. : Высшая школа, 2007. – 381 с.
21. Горский В. Г. Планирование промышленных экспериментов (модели статики) / В. Г. Горский, Ю. П. Адлер. – М. : Металлургия, 1974. – 264 с.
22. Горячева И.Г. Механика фрикционного взаимодействия. М.: Наука, 2001. 478 с.
23. ГОСТ 1320-74 (ИСО 4383-91) Баббиты оловянные и свинцовые. Технические условия (с изменениями N 1-7)
24. Граменицкий Е.Н., Котельников А.Р., Батанова А.М., Щекина Т.И., Плечев П.Ю. Экспериментальная и техническая петрология. – М.: Научный мир, 2000. – 416 с. ISBN 5-89176-120-3.
25. Громыко А.Г. Восстановление подшипников скольжения с антифрикционным слоем из баббита // Технология металлов № 2. 2000. С. 16-22.
26. Громыко А.Г., Лукьянченков В.В. RU 2167738 С2. Способ заливки вкладышей подшипников скольжения баббитом. Калининградский государственный технический университет, 27.05.2001.
27. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия : пер. с англ. / К. Джонсон. – М. : Мир, 1989. – 510 с. : ил.

28. Динамика машин и управление машинами : справ. / под ред. Г. В. Крейна. – М.: Машиностроение, 1988. – 240 с. – (Основы проектирования машин).
29. Допуски и посадки. Справочник. В 2-х т. Т.1 / В.Д. Мягков, П.А. Палей, А.Б. Романов, В.А. Брагинский. – 6-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, Ленингр. Отд-ние, 2002
30. Допуски и посадки. Справочник. В 2-х т. Т.2 / В.Д. Мягков, П.А. Палей, А.Б. Романов, В.А. Брагинский. – 6-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, Ленингр. Отд-ние, 2002
31. Дриц М.Е. Влияние структуры на свойства высокооловянистого баббита / Трение и износ в машинах. Сб. научн. тр. М. Л. АН СССР. 1950. Вып. 5. С 83 - 93;
32. Дриц М.Х., Ильин А. Антифрикционные материалы в машиностроении - Гостехиздат Украины. 1947 164 с;
33. Дрозд М. С. Инженерные расчеты упругопластической контактной деформации / М. С. Дрозд, М. М. Матлин, Ю. И. Сидякин. – М. Машиностроение, 1986.- 220 с.
34. Дубровский В.А. Д79 Пособие слесаря-ремонтника. М., «Колос», 1973.
35. Дуюн Т.А., Бешевли О.Б. Зависимость температуры в зоне резания и качества обработанной поверхности от режимов резания при фрезеровании баббитов различных марок. Сборник статей международной научно-технической конференции. Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении, 14-15 сентября 2015г., Севастополь.
36. Еремеева Н. В. Конкурентоспособность товаров и услуг : учеб. пособие / Н. В. Еремеева, С. Л. Калачев. – М. : КолосС, 2006. – 191 с. – (Учебники и учебные пособия для студентов высших учебных заведений).

37. Ермаков С. М. Математическая теория оптимального эксперимента : учеб. пособие / С. М. Ермаков, А. А. Жиглявский; с предисл. Г. И. Марчука. – М. : Наука, 1987. – 319 с.
38. Ермолаев А.А., Буянов И.М. RU 2154755 С2. Способ изготовления вкладышей подшипников скольжения. 20.08.2000.
39. Жиряков Е. В. Определение истинной деформации при локальном деформировании [Электронный ресурс] / Е. В. Жиряков, Д. О. Дорохов // Актуальные проблемы техники и технологии машиностроительного производства: III студенч. регион. науч.- техн. конф. Орел, 25 февр.- 23 апр. 2010 г. – Режим доступа : <http://www.poznanie.ostu.ru/science/ti2010/papers.php>
40. Ильинский Н. Ф. Общий курс электропривода : учеб. / Н. Ф. Ильинский, В. Ф. Козаченко. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 543 с.
41. Зернин М.В., Яковлев А.В. К исследованию усталостной долговечности баббитового слоя тяжело нагруженных подшипников скольжения. / „Заводская лаборатория" 1997 №11, том 63, С. 39 47.
42. Касимов Л. Н. Ресурсосберегающие технологии механической обработки труднообрабатываемых материалов: моногр. /Л. Н. Касимов. – Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2003. – 182 с.
43. Кельтон В. Имитационное моделирование. Классика CS / В. Кельтон, А. Лоу. – 3- е изд. – СПб. : Питер; Киев: ВНУ, 2004. – 847 с.
44. Коровчинский М.В. Теоретические основы работы подшипников скольжения, Машгиз, 1959.
45. Котов Г.М., Цветков В.В., Пальчиков А.И., Маренцев В.А. и др. RU 2160652 С2. Способ нанесения баббита на подшипник. НПП „Технология", 20.12.2000;
46. Лебедев Л.В. Технология машиностроения Учебник для студ. высш. учеб. заведений/ Л.В. Лебедев, В.У. Мнацаканян, А.А. Погонин, А.Г. Схиртладзе, В.А. Тимирязев, И.В. Шрубченко – М.: Издательский центр «Академия», 2008. – 528 с.

47. Лозовая С.Ю., Бешевли О.Б., Дуюн Т.А., Воробьев Н.Д. Повышение эффективности ремонтной обработки опорных узлов крупногабаритных вращающихся агрегатов. Вестник ИрГТУ №7 2015. с 60-66

48. Лозовая С.Ю., Бешевли О.Б., Дуюн Т.А., Воробьев Н.Д. Обеспечение технологических параметров фрезерования баббита при ремонтной обработке крупногабаритных подшипников скольжения. Фундаментальные исследования №9 (часть 2) с. 273-278

49. Лурье Г.Б. замена ручного труда при шабрении: Учеб. пособие для слушателей заочных курсов повышения квалификации ИТР по сокращению и замене ручного труда в механосборочных цехах. – М.: Машиностроение, 1985, 32 с.

50. Любичева А. Н. Контактное взаимодействие и изнашивание неоднородных тел: дис. канд. физико-мат. наук: специальность 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела /А. Н. Любичева; науч. рук. И. Г. Горячева; ин-т проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН. – М., 2008.

51. Магомедов Ш. Ш. Конкурентоспособность товаров: учеб. пособие / Ш. Ш. Магомедов. – М. : Дашков и Ко, 2003. – 294 с.

52. Макогон Ю. А. Бондаренко// Материалы международной научно-технической конференции «Новые конкурентоспособные и прогрессивные технологии, машины и механизмы в условиях современного рынка». Могилев. 2000. С. 214-217.

53. Максименко А. А. Исследование нормальных напряжений при упругопластическом контактном взаимодействии /А. А. Максименко, Н. В. Котенева, А. Д. Перфильева // Ползуновский вестн. – 2009. – № 1-2. – С. 264-266.

54. Математическая модель формирования регулярной шероховатости в зависимости от режимов резания и температуры нагрева обрабатываемой детали. В.И. Котельников, В.А. Зотова. //Материалы

Всероссийской н/пр. конференции «Современные аспекты компьютерной интеграции Машиностроительного производства». Оренбург, ОГУ, 2003.

55. Минько Э. В. Качество и конкурентоспособность /Э. В. Минько, М. Л. Кричевский. – СПб.: Питер, 2004. – 268 с. – (Теория и практика менеджмента).

56. Михайлов А.Н. К вопросу назначения припусков и повышению качества поверхностного слоя и эффективности обработки изделий // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Междунар. сб. науч. тр. - Донецк: ДонГТУ, 2003. - Вып. 24.

57. Морозов Н. Ф. Математические вопросы механики разрушения / Н. Ф. Морозов //Соросовский образовательный журнал. – 1996. - № 8. – С. 117-122.

58. Мышенков К.С, Романов А.Ю. Система управления ремонтами оборудования, как элемент системы стратегического управления предприятием // Стратегическое управление организациями: проблемы и возможности современной экономики: Сб. науч. тр. СПб.: Изд-во Политехи, ун-та, 2009. - Ч. 1.

59. Мышенков К.С, Романов А.Ю. Постановка задачи составления календарного плана ремонтов оборудования предприятия // Системный анализ в проектировании и управлении: Сб. науч. тр. XIV Междунар. науч.-практ. конф. - СПб.: Изд-во Политехи, ун-та, 2010. - Ч. 1.

60. Надежность и ремонт машин / Под ред. В. В. Курчаткина: Учеб. - М.: Колос, 2000. - 777 с.

61. Неумоина Н.Г., Белов А.В. Тепловые процессы в технологической системе резания: Учеб. пособие / ВолгГТУ, Волгоград, 2006. – 84 с. ISBN 5-230-04834-4

62. Основы теории резания материалов М75: учебник [для высш. Учебн. заведений]/ Мазур Н.П., Внуков Ю.Н., Грабченко А.И. и др. ; под общ. Ред. Н.П. Мазура и А.И. Грабченко. – 2-е изд., перераб. и дополн. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2013. – 534 с.

63. Першин В.А., Столпнер М.Е., Хмелевская В.Б. RU 2057973 С1. Способ восстановления вкладышей подшипников скольжения. Российский концерн „Норильский никель“, Институт „Гипроникель“, 10.04.96.
64. Петриченко В.К. Антифрикционные материалы и подшипники скольжения М.: Машгиз. 1954. 383 с;
65. Погонин А. А. Исследование процесса точения крупногабаритных изделий при нестационарной обработке [Текст] / А. А. Погонин, М.С. Чепчуров // Экспресс-обзор. Промышленность строительных материалов. Сер.1. Цементная промышленность. – 2002.– Вып.4. –С. 14–21. ISSN – 0234–1638.
66. Погонин А.А. Гибкая мобильная технология восстановления геометрической точности крупногабаритных деталей [Текст] / А.А. Погонин, М.С. Чепчуров, А.В. Хуртасенко и др. Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова»: материалы Международного конгресса «Современные технологии в промышленности строительных материалов и стройиндустрии», посвященного 150-летию В.Г. Шухова. – Белгород. –2003. – №7. –С. 73–72.
67. Покровский Б.С. Справочник слесаря: учеб. Пособие для нач. проф. Образования/ Б.С. Покровский, В.А. Скакун. – 3-е изд., стер. – М.: Издательский центр «Академия», 2007.-384с.
68. Потехин Б.А., Глущенко А.Н., Илюшин В.В. Патент РФ на полезную модель № 38649, „Устройство для заливки подшипников скольжения" БИ № 19, 2004.
69. Потехин Б.А., Глущенко А.Н., Илюшин В.В. Структурная зависимость свойств баббита марки Б83. // Технология металлов. 2006. №1. С. 28 36;
70. Работнов Ю. Н. Механика деформируемого твердого тела : учеб. пособие / Ю. Н. Работнов. – 2-е изд., испр. - М. : Наука, 1988. – 712 с.
71. Резников А.Н. Теплообмен при резании и охлаждение инструментов. М., Машгиз, 1963, 199с.

72. Резников А.Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов. М.: Машиностроение, 1981. – 279 с.
73. Резников А.Н. Теплофизика резания. М., «Машиностроение», 1969, 287 с.
74. Резников А.Н., Резников Л.А. Тепловые процессы в технологических системах. – М.: Машиностроение, 1990. – 288 с.
75. Руководство по гигиенической оценке факторов рабочей среды и трудового процесса. Критерии и классификация условий труда : Р 2.2.2006-05 : утв. Гл. гос. санитар. врачом Рос. Федерации 29.06.05 : взамен Р 2.2.755-99 : введ. с 01.11.05. – М., 2005. – 137 с.
76. С.А. Чернавский Подшипники скольжения. М., «МАШГИЗ», 1963., 243с.
77. Седов Д.И. Повышение эффективности обработки труднообрабатываемых материалов / Д.И. Седов // Автоматизация и управление в машино- и приборостроении: сб. науч. тр. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2008.
78. Смазочно-охлаждающие технологические средства для обработки металлов резанием: Справочник/Под ред. С.Г. Энтелиса, Э.М. Берлинера.-М.: Машиностроение, 1986. 352 с. с ил.
79. Смирнов В. И. Пороговые характеристики хрупкого разрушения твердых тел : автореф. дис. д-ра техн. наук : специальность: 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела / В. И. Смирнов ; науч. консультант Ю. В. Петров ; СПбУ. – СПб., 2007.
80. Солод Г.И., Морозов В.И., Русихин В.И. Технология машиностроения и ремонт горных машин: учебник для вузов. – М.: Недра, 1988. – 421 с.
81. Справочник по конструкционным материалам: Справочник / Б.Н. Арзамасов, Т.В. Соловьева, С.А. Герасимов и др.;Под ред. Б.Н. Арзамасова, Т.В. Соловьевой.-М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005.-640 с.: ил.

82. Справочник технолога – машиностроителя. В 2-х томах С74 Т. 1/ Под ред. А.М. Дальского, А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова, А.Г. Сулова. – п5-е изд., исправл. – М.: Машиностроение – 1, 2003 г. 912 с., ил.
83. 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
84. Стюарт М. Джонс, Витас Свалбонас Крупногабаритные мельницы измельчения компании Metso Minerals// Горная промышленность №6 2004.
85. Технический регламент Таможенного союза «О безопасности машин и оборудования». ТР ТС 010/2011. Утвержден Решением Комиссии Таможенного союза от 18.10.2011 № 823.
86. Технологические процессы в машиностроении : учеб. для студентов вузов / С. И. Богодухов, А. Г. Схиртладзе, Р. М. Сулейманов, А. Д. Проскурин. – Старый Оскол: ТНТ, 2011. – 624 с.
87. Технология тяжелого машиностроения С.И. Самойлов, В.М. Горелов, В.М. Браславский и др. М.: Машиностроение, 1967. 594 с.
88. Ткачук Н. Н. Оценка контактных напряжений в сопряжении сложнопрофильных деталей / Н. Н. Ткачук // Вестник НТУ «ХПИ». – 2006. – Вып. 24.
89. Хрущев М. М. «Трение, износ и микротвёрдость материалов» – Избранные работы к 120-летию со дня рождения, М. 2011, 510с.
90. Федоренко, М.А. Анализ возможности применения лезвийных инструментов для бездемонтажной обработки поверхности цапф [Текст]/М.А. Федоренко, Ю.А Бондаренко// Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов. Межвузовский сборник статей. Белгород. Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова. 2003. С. 273-277.

91. Федоренко М.А. Обеспечение шероховатости обрабатываемых поверхностей крупногабаритных деталей приставными станочными модулями методами шлифования. [Текст]/ М.А. Федоренко// Вестник БГТУ им. В.Г.Шухова, № 3, Белгород, изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2008 г. с. 48-50.
92. Цветные металлы и сплавы: учеб.-метод. Пособие / С.В. Щербаков, А.А. Рогачев, М.А. Ярмоленко; М-во образования Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель: БелГУТ, 2009. – 86 с.
93. Чепчуров М.С. Анализ и задачи оптимизации параметров конструкций мобильных станков [Текст] / М.С. Чепчуров, А.В. Хуртасенко, А.А. Максимов. Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2005. – № 11. –С. 349–352.
94. Чепчуров М.С. Вопросы расчета параметров базовых элементов мобильных станочных модулей/ М.С. Чепчуров, А.А. Погонин, А.В. Хуртасенко // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова, – 2005. – № 11. – С. 380–382.
95. Экономика предприятия : учеб. пособие / Т. А. Симунина [и др.]. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Кнорус, 2008. – 245 с.
96. Яблонский А. А. Курс теоретической механики. Статика. Кинематика. Динамика : учеб. пособие / А. А. Яблонский, В. М. Никифорова. – Изд. 7-е, стер. – СПб. : Лань, 1999. – 764 с. – (Учебники для вузов. Специальная литература).
97. Ящерицын П. И. Теория резания : учеб. / П. И. Ящерицын, Е. Э. Фельдштейн, М. А. Корниевич. – 3-е изд., стер. – М. : Новое знание, 2008. – 512 с. – (Техническое образование).
98. Altintas Y., Budak E. Analytical Prediction of Stability Lobes in Milling // Annals of CIRP. 1995. V.44, № 1. P. 357-362.
99. Balachandran B., Zhao M.X. A mechanics based model for study of dynamics of milling operations // Meccanica. 2000. V. 35. P. 89-109.
100. Bowden F.P., Tabov D. The friction and lubrication of solids, pt. II. Oxford, Claredon Press, 1964.

101. Calculation of the specific cutting coefficients and geometrical aspects in sculptured surface machining / Lamikiz A. et al. // *Machining Science and Technology*. 2005. V. 9, № 3. P. 411-436.
102. Campomanes M.L., Altintas Y. An Improved Time Domain Simulation for Dynamic Milling at Small Radial Immersions // *Trans. ASME. Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2003. V. 125. P. 416-425.
103. Dettmer, P. B. *Mining Engineering* 5. - 1968.
104. Devine M.J. Cevini J.P., Stallings L. Improving frictional behavior with solid film lubricants. *Metalls Engng Quart.* 1967, 7, № 2.
105. Elbestawi M. A., Sagherian R. Dynamic Modeling for the Prediction of Surface Errors in Milling of Thin-Walled Sections // *Journal of Material Processing Technologies*. 1991. V. 25, № 2. P. 215-228.
106. Fedunets N.I., Goncharenko S.N. The definition of optimum strategic parameters of the mining enterprise by developing investment strategy. *Proceedings of the 33rd International Symposium on the Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry-APCOM 2007.* – Santiago, Chile.: GECAMIN LTDA. – 2007. – P. 703-708.
107. General geometric modeling approach for machining process simulation / El-Mounayri H. et al. // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 1997. V. 13. P. 237-247.
108. Hackmann, von T. Пути повышения эффективности процессов механической обработки деталей / Hackmann von T. // *Maschinenmarkt.* – 2007. - № 6. – S. 20-23.
109. Insperger, T., Stepan, G. Stability of the Milling Process // *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*. 2000. V. 44, №. 1. P. 47-57.
110. J. An, Y.B. Liu, Y. Lu. The influence of Pb on the friction and wear behavior of Al– Si–Pb alloys. // *Materials Science and Engineering A* 373 (2004) 294–302.

111. Lorong Ph., Coffignal G., Guskov M. Simulation of a finishing operation: milling of a turbine blade and influence of damping // Proceedings of ASME 11-th.
112. Ozturk B., Lazoglu I. Machining of free-form surfaces. Part I: Analytical chip load // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2006. V. 46. P. 728-735.
113. Simulation of low rigidity part machining applied to thin-walled structures / Arnaud L. et al. // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2011. V. 54. P. 479-488.
114. Spence A.D., Abrari F., Elbestawi M.A. Integrated solid modeler based solutions for machining // Computer Aided Design. 2000. V. 32. P. 553-568.
115. Stroiber, W. Comminution Technology and Energy consumption. Part 1 / W. Stroiber // Cement International. – 2003. - №2.
116. Weiter, E. Повышение производительности обработки / E. Weiter // Maschinenmarkt. – 2006. - № 36. – S. 100-102.
117. Wehr, Robert. Fuller Company, USA. Roller mill successes of the 1990s /Robert Wehr // INTERNATIONAL CEMENT REVIEW. - April 1999.
118. Z.C. Lu, Y. Gao, M.Q. Zeng, M. Zhu. Improving wear performance of dual-scale Al–Sn alloys: The role of Mg addition in enhancing Sn distribution and tribolayer stability. // Wear 309 (2014) 216–225.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Акт внедрения на ОАО «Оскольский завод металлургического машиностроения»

Главный инженер

ОАО «Оскольский завод металлургического машиностроения»

Рудов В.И.

«28» 08 2017г.



Акт

Передачи результатов экспериментальных исследований по обработке баббита фрезерным оборудованием в лабораторных условиях, конструкторской документации специального ремонтного станка и рекомендаций для осуществления его промышленного внедрения на АО «Оскольский завод металлургического машиностроения»

От АО «ОЗММ»

Рудов Виктор Иванович – главный инженер

От БГТУ им. В.Г. Шухова

Дуюн Татьяна Александровна – доктор технических наук, доцент;

Бешевли Олег Борисович – аспирант.

Мы, нижеподписавшиеся, составили настоящий акт о том, что на АО «ОЗММ» передана документация для изготовления и внедрения специального оборудования для механической обработки внутренней поверхности вкладышей крупногабаритных подшипников скольжения. Внедрение нового ремонтного оборудования будет производиться в соответствии с программой модернизации технологического оборудования предприятия. Некоторые из результатов были рассмотрены и опробованы на имеющемся оборудовании. При использовании рекомендуемых режимов резания производительность повысилась на 12%.

Патент на полезную модель «Станок для фрезерования баббитовых вкладышей крупногабаритных подшипников скольжения»



ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ фрезерование баббита

вид обработки

 $W := 1$ **ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ:**

Ne := 2 мощность привода главного движения, кВт

D := 60 диаметр фрезы, мм

z := 4 количество зубьев фрезы

 $T_{in} := 160$ стойкость инструмента, мин

Tr := 130 допустимая температура резания, С

 $H_{in} := 850$ ширина обработки по ширине сегмента, мм

Dp := 2400 диаметр подшипника, мм

 $L_{in} := Dp \cdot \frac{\pi}{3}$ L = 2.513 × 10³ длина обработки по дуге сегмента, мм

глубина резания устанавливается автоматически в зависимости от вида обработки:

1 - глубина 1 мм	t :=	$\begin{cases} 1 & \text{if } W = 1 \\ 2 & \text{if } W = 2 \\ 3 & \text{if } W = 3 \end{cases}$
2 - глубина 2 мм		
3 - глубина 3 мм		

ограничение по мощности привода главного движения:

B := 0.8 · D B = 48 ширина фрезерования, мм

$$b1 := \ln \left(\frac{Ne \cdot 100^{0.75}}{1.72 \cdot 10^{-5} t^{0.85} \cdot B \cdot z \cdot D^{0.2}} \right) \quad b1 = 9.041$$

ограничение по стойкости инструмента:

$$b2 := \ln \left(\frac{155 \cdot 1000 \cdot 100^{0.4}}{\pi D^{0.75} \cdot T^{0.2} \cdot t^{0.1} \cdot B^{0.15} \cdot z^{0.1}} \right) \quad b2 = 7.843$$

ограничение по времени обработки:

$$b3 := \ln \left[\frac{(L \cdot H \cdot 100)}{(B \cdot T \cdot z)} \right] \quad b3 = 8.847$$

ограничение по температуре резания:

$$b4 := \ln \left(\frac{Tr \cdot 100^{0.57} \cdot D}{33t^{0.47} \cdot B^{0.95}} \right) \quad b4 = 4.413$$

РАСЧЕТ 1 (решение системы уравнений по ограничениям):

smin := 0.05 nmin := 300

smax := 0.25 nmax := 2000

x1 := 1 x2 := 1

$$f(x_1, x_2) := x_1 + x_2$$

Given

$$0.75 \cdot x_1 + 0.9x_2 \leq b_1$$

$$0.4 \cdot x_1 + x_2 \leq b_2$$

$$x_1 + x_2 \geq b_3$$

$$0.57 \cdot x_1 + 0.38x_2 \leq b_4$$

$$\ln(100 \cdot s_{\min}) \leq x_1 \leq \ln(100 \cdot s_{\max})$$

$$\ln(n_{\min}) \leq x_2 \leq \ln(n_{\max})$$

$$F := \text{Maximize}(f, x_1, x_2)$$

$$F = \begin{pmatrix} 3.219 \\ 6.556 \end{pmatrix}$$

$$s := \frac{e^{F_{0,0}}}{100} \quad s = 0.25$$

$$n := e^{F_{1,0}} \quad n = 703.358$$

$$v := \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \quad v = 132.58$$

Проверка 1:

ограничение по мощности привода главного движения:

$$P_z := \frac{336 \cdot t^{0.85} \cdot s^{0.75} \cdot B}{D^{0.8} \cdot n^{0.1}} \quad P_z = 111.891$$

$$N_e := \frac{P_z \cdot v}{1020 \cdot 60} \quad N_e = 0.242$$

ограничение по стойкости инструмента:

$$v_1 := \frac{155D^{0.25}}{T^{0.2} \cdot t^{0.1} \cdot s^{0.4} \cdot B^{0.15} \cdot z^{0.1}} \quad v_1 = 132.58$$

ограничение по времени обработки:

$$T_1 := \frac{L \cdot H}{s \cdot n \cdot z \cdot B} \quad T_1 = 63.276$$

ограничение по температуре резания:

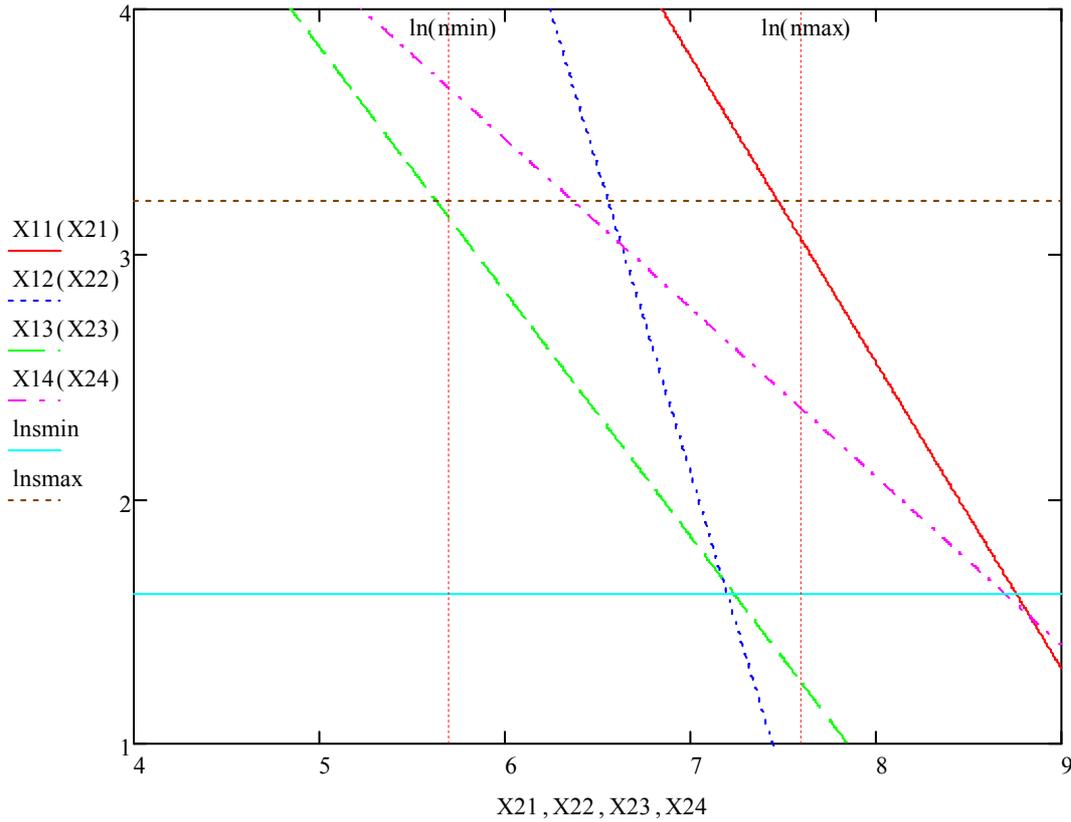
$$T_r := \frac{33 \cdot t^{0.47} \cdot s^{0.57} \cdot B^{0.95} \cdot n^{0.38}}{D} \quad T_r = 119.205$$

Графическое отображение результатов оптимизации

$$s_{\min} = 0.05 \quad s_{\max} = 0.25 \quad n_{\min} := 300 \quad n_{\max} = 2 \times 10^3$$

$$X_{11}(X_{21}) := \frac{b_1 - 0.9X_{21}}{0.72} \quad X_{12}(X_{22}) := \frac{b_2 - X_{22}}{0.4} \quad X_{13}(X_{23}) := b_3 - X_{23}$$

$$X_{14}(X_{24}) := \frac{b_4 - 0.4X_{24}}{0.58} \quad \ln s_{\min} := \ln(100 \cdot s_{\min}) \quad \ln s_{\max} := \ln(100 \cdot s_{\max})$$



РАСЧЕТ 2(корректировка подачи по заданной шероховатости):

требуемая шероховатость устанавливается автоматически в зависимости от вида обработки :

- 1- Ra 3.2
- 2 - Ra 6.3
- 3 - Ra 8.5

$$\begin{aligned}
 V_0 &:= 105 & S_{z0} &:= 0.2 & t_0 &:= 1.5 \\
 \Delta V &:= 35 & \Delta S_z &:= 0.1 & \Delta t &:= 0.75 \\
 S_z &:= 1 & \frac{V}{V_0} &:= 1
 \end{aligned}$$

$$\frac{R}{\sqrt{W}} := \begin{cases} 3.2 & \text{if } W = 1 \\ 6.3 & \text{if } W = 2 \\ 8.5 & \text{if } W = 3 \end{cases}$$

$$Ra(V, S_z) := 5.022 + 0.014 \left(\frac{V - V_0}{\Delta V} \right) + 3.507 \left(\frac{S_z - S_{z0}}{\Delta S_z} \right) + 0.375 \left(\frac{V - V_0}{\Delta V} \right) \cdot \left(\frac{S_z - S_{z0}}{\Delta S_z} \right) + 0.25 \left(\frac{V - V_0}{\Delta V} \right) \cdot \left(\frac{t - t_0}{\Delta t} \right) + 0.445 \left(\left(\frac{V - V_0}{\Delta V} \right) \right)^2 + 0.285 \left(\left(\frac{S_z - S_{z0}}{\Delta S_z} \right) \right)^2 + 0.815 \left(\left(\frac{t - t_0}{\Delta t} \right) \right)^2$$

Given

$$Ra(V, S_z) \leq R$$

$$0.05 \leq S_z \leq s$$

$$V = v$$

$$Y := \text{Maximize} (Ra, V, S_z)$$

$$Y = \begin{pmatrix} 132.58 \\ 0.135 \end{pmatrix}$$

$$\frac{n}{\sqrt{W}} := \frac{1000 \cdot Y_{0,0}}{\pi \cdot D} \quad n = 703.358$$

Проверка 2:
фактическая шероховатость

$$Ra(Y_{0,0}, Y_{1,0}) = 3.201$$

фактическая скорость

$$V_f := Y_{0,0} = 132.58$$

допустимая скорость

$$v_1 := \frac{155D^{0.25}}{T^{0.2} \cdot t^{0.1} \cdot (Y_{1,0})^{0.4} \cdot B^{0.15} \cdot z^{0.1}}$$

фактическая подача

$$S_{zf} := Y_{1,0} = 0.135$$

$$v_1 = 169.463$$

фактическая сила и мощность привода главного движения:

$$P_z := \frac{336 \cdot t^{0.85} \cdot (Y_{1,0})^{0.75} \cdot B}{D^{0.8} \cdot n^{0.1}} \quad P_z = 70.62$$

$$n = 703.358$$

$$N_e := \frac{P_z \cdot Y_{0,0}}{1020 \cdot 60} \quad N_e = 0.153$$

фактическое время обработки:

$$T_1 := \frac{L \cdot H}{Y_{1,0} \cdot n \cdot z \cdot B} \quad T_1 = 116.879$$

фактическая температура резания:

$$T_r := \frac{33 \cdot t^{0.47} \cdot (Y_{1,0})^{0.57} \cdot B^{0.95} \cdot n^{0.38}}{D} \quad T_r = 84.022$$